

January 2006

БЕЗОПАСНОСТЬ ПЛОТИН НА РАСТВОРИМЫХ ПОРОДАХ (на примере Камской ГЭС)

N. G. Maximovich

Follow this and additional works at: https://digitalcommons.usf.edu/kip_articles

Recommended Citation

Maximovich, N. G., "БЕЗОПАСНОСТЬ ПЛОТИН НА РАСТВОРИМЫХ ПОРОДАХ (на примере Камской ГЭС)" (2006). *KIP Articles*. 5672.

https://digitalcommons.usf.edu/kip_articles/5672

This Article is brought to you for free and open access by the KIP Research Publications at Digital Commons @ University of South Florida. It has been accepted for inclusion in KIP Articles by an authorized administrator of Digital Commons @ University of South Florida. For more information, please contact digitalcommons@usf.edu.

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО НАУКЕ И ИННОВАЦИЯМ**
Федеральное государственное научное учреждение
«Естественнонаучный институт»

**THE RUSSIAN FEDERAL AGENCY FOR SCIENCE
AND INNOVATIONS**
Federal state scientific institution
«Institute of Natural Science»

The selected works

N.G.Maximovich

**SAFETY OF DAMS ON
SOLUBLE ROCK**

**(The Kama hydroelectric power station
as an example)**

**Perm
2006**

Избранные труды

Н.Г. Максимович

БЕЗОПАСНОСТЬ ПЛОТИН НА РАСТВОРИМЫХ ПОРОДАХ

(на примере Камской ГЭС)

**Пермь
2006**

УДК 624.138:627.43(470.53)
ББК 26.3(2Рос-4Пер)
М 17

Максимович Н.Г.

М17 Безопасность плотин на растворимых породах (на примере Камской ГЭС). / Н.Г. Максимович. – Пермь: ООО ПС «Гармония», 2006. – 212 с.

Табл. 15, Ил. 60, Библ. 196 назв.

ISBN 5-88187-309-2

В монографии дается представление об особенностях строительства плотин, в основании которых залегают растворимые породы. Опыт строительства плотин в России, Австрии, Германии, Китае, США, Франции и других странах показывает, что отсутствие надежных мероприятий по защите таких пород от растворения может привести к трагическим последствиям.

Проблема безопасности плотин рассмотрена на примере действующей Камской ГЭС. Здесь в связи с начавшимся растворением гипса основания плотины производилось доуплотнение цементационной завесы щелочным шавелевоалюмосиликатным раствором. Анализируется влияние изменившихся фильтрационных параметров и геохимической обстановки на растворимость гипса и устойчивость плотины.

Издание предназначено геологам, геохимикам, студентам геологических и технических специальностей, а также широкому кругу специалистов в области гидротехнического строительства.

Редакционный совет серии «Избранные труды ученых Естественного института»: В.П. Бегишев (главный редактор), О.С. Кудряшова, Г.Г. Абашев.

Издание монографии осуществлено при финансовой поддержке Министерства промышленности и природных ресурсов Пермского края и Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Пермский государственный Университет»

Рецензенты: *Лаборатория охраны геологической среды* Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; **В.П. Хоменко**, д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник ОАО «Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве»; **И.В. Семенов**, канд. техн. наук, научный руководитель ОАО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» РАО ЕЭС России.

Maximovich N.G.

М17 Safety of dams on soluble rock (The Kama hydroelectric power station as an example) / N.G. Maximovich. – Perm: PS «Harmony», 2006. – 212 p.

Table 15, Il. 60, References 196.

This work details the technical aspects and problems of constructing hydraulic structures where soluble rocks are present in the foundations. Experience gained from dam construction in Russia, Austria, Germany, China, USA, France and other countries has shown that the lack of dissolution prevention in soluble rock foundations can lead to failure and tragic consequences.

The problem of dam safety has been carefully studied at the operating Kama hydroelectric power station. Because of gypsum dissolution in the dam foundations, additional grouting and solidification of the bedrock was undertaken using an oxaloaluminosilicate solution. The impact of these remediation techniques on the seepage properties and geochemical conditions for the dissolution of gypsum and dam stability are analyzed and presented.

This book is aimed at professionals employed in the field of hydrotechnical construction including geologists, geochemists and students of geology, engineering geology and civil engineering.

УДК 624.138:627.43(470.53)

ББК 26.3(2Рос-4Пер)

© Н.Г. Максимович, 2006

© ООО ПС «Гармония», 2006

ISBN 5-88187-309-2

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО

Этой книгой мы открываем серию публикаций избранных трудов ученых Федерального государственного научного учреждения «Естественнонаучный институт» (ЕНИ) Федерального агентства по науке и инновациям. Институт был создан в 1921 г. С момента образования в нем работали выдающиеся ученые: профессора А.А. Заварзин, Б.Ф. Вериге, Д.М. Федотов, А.А. Рихтер, В.Н. Беклемишев, А.Г. Генкель, А.О. Таусон, В.В. Никитин и др. Важной частью работы института всегда была издательская деятельность. Институт отправлял свои издания в 275 научных учреждений Европы, Америки, Австралии и Африки и 190 организаций СССР. В конце 2005 г. было принято решение начать выпуск серии трудов известных ученых ЕНИ.

Мы начинаем публикацию трудов с работы Н.Г. Максимовича «Безопасность плотин на растворимых породах (на примере Камской ГЭС)». Николай Георгиевич Максимович пришел в наш институт в 1978 г. сразу после окончания геологического факультета МГУ. С его появлением в институте начало активно развиваться геологическое направление. Специалист в области инженерной геологии и гидрогеологии он начинает активно заниматься экологическими проблемами. В 1989 г. им создана лаборатория геологии техногенных процессов, которая объединила специалистов, решающих фундаментальные и прикладные проблемы в области экологии, инженерной геологии, гидрогеологии, геохимии, нефтяной геологии, карстоведения, научной спелеологии и др.

С середины 90-х гг. Николай Георгиевич возглавляет крупные комплексные экологические проекты, связанные с уничтожением химического оружия, испытаний и ликвидации ракетной техники, разработкой месторождений нефти, угля, калийных солей, золота и алмазов и другими острыми экологическими проблемами. Широка география проводимых им исследований. Это республики Бурятия, Удмуртия, Красноярский и Хабаровский края, Владимирская, Курганская, Пензенская, Свердловская, Тюменская, Челябинская области, Ханты-Мансийский автономный округ, и естественно, Пермский край, где он участвовал при решении многих геологических и экологических проблем.

С 1997 г. Н.Г. Максимович работает заместителем директора по научной работе ЕНИ. За время его работы значительно увеличились объемы научных исследований института, появились новые источники финансирования. Вырос коллектив института в значительной мере за счет прихода молодых специалистов. Расширилась международная деятельность. Значительные объемы работ института выполняются по контрактам, финансируемым правительством США (уничтожение химического оружия и ракет). Укреплены международные связи с Болгарией, Великобританией,

Германией, Италией, Казахстаном, Канадой, Киргизией, Китаем, Литвой, США, Чехией, Южной Кореей, Японией и др. Буквально на днях подписан контракт на работы в Таджикистане в связи с возобновлением строительства Сангтудинской ГЭС.

Николай Георгиевич родился в семье ученых — геологов, известных во всем мире по работам, связанным с изучением карста. Очевидно, интуитивно понимая, что будет находиться в их тени, он стал искать свои пути в геологии. В отличие от родителей, занимающихся главным образом фундаментальными проблемами, он больше тяготеет к решению практических вопросов. Им подготовлено более 100 научно-производственных отчетов, имеет патенты, многие технические решения внедрены в практику. В последние годы наметилась положительная, на мой взгляд, тенденция к обобщению накопленного им многочисленного материала, о чем говорит и эта монография.

В ближайшее время мы продолжим публикацию трудов ученых старейшего в России научно-исследовательского института.

*В.П. Бегишев, директор
ФГНУ «Естественнонаучный институт»,
профессор, доктор химических наук,
заслуженный деятель науки и техники РФ*

ОТ АВТОРА

Решение опубликовать в полном объеме результаты работ, выполненных в основном в 80-е гг., посвященных безопасности плотин на растворимых породах, обусловлено несколькими причинами. Одна из них, которая натолкнула на эту мысль, - это интерес, проявленный к фрагментам этой работы, размещенной на сайте <http://nsi.psu.ru/labs/gtp/publicat.html>. Среди более 300 статей автора работы эти публикации, вызывают не меньший интерес, чем современные, посвященные экологическим аспектам инженерной геологии, гидрогеологии, геохимии. Большой интерес был проявлен к докладу, сделанному в 2005 г. в Болгарии на Международном симпозиуме «Стихийные бедствия последнего времени — проблемы, стоящие перед инженерной геологией, геотехникой и гражданской защитой», где в качестве примера был освещен опыт безопасной эксплуатации Камской ГЭС, стоящей на гипсоносных породах.

Другая причина публикации книги — некоторое оживление в последние годы гидротехнического строительства в России и республиках бывшего СССР, которое было фактически свернуто в 90-е гг. В сентябре 2005 г. начаты работы по достройке Рогунской ГЭС, в основании которой залегают растворимые породы. В этом же году состоялась официальная церемония начала реализации российско-таджикского проекта строительства Сангтудинской ГЭС-1. Эта ГЭС расположена на р. Вахш в 200 км к югу от г. Душанбе. Строительство станции началось в конце 1980-х гг., было выполнено 20 % необходимых работ, которые в начале 90-х гг. приостановлены из-за отсутствия финансирования. В районе станции широко развит карбонатный и сульфатный карст. Карстовые процессы могут существенным образом повлиять на параметры противофильтрационных элементов плотины, параметры производства цементационных работ и другие проектные и технические решения. Опыт Камской ГЭС может широко использоваться при строительстве Сангтудинской ГЭС, в связи с чем автор был привлечен к работам по этой плотине.

Еще одной причиной публикации материалов является вновь проявившийся интерес к химическому закреплению грунтов. Проблемы закрепления грунтов активно разрабатывались в 50 — 80-е гг. XX в. С 1958 по 1983 г. в Риге, Москве, Киеве, Тбилиси, Новосибирске, Ленинграде, Ташкенте, Ростове-на-Дону проведено десять всесоюзных совещаний по закреплению грунтов. В связи с ухудшением экономической ситуации и сокращением строительства в 90-е гг. развитие этого направления затормозилось. Однако очевидные преимущества химического закрепления, особенно при решении сложных геотехнических проблем, вновь привлекли внимание к этим методам. Очевидно, с этим же связано издание в 2005 г. С.Д. Ворон-

кевичем после 20-летнего перерыва новой редакции учебника «Основы технической мелиорации грунтов», где, кстати, используются материалы работ автора.

Активная фаза исследований автора в области безопасности гидротехнических сооружений была завершена после решения проблемы с растворением гипса в основании Камской ГЭС и свертывания работ по строительству Нижне-Каферниганской плотины (Таджикистан), где также в основании залегают гипсы.

Все эти причины побудили автора опубликовать материалы, которые могут представлять интерес для современных исследований в области закрепления грунтов и гидротехнического строительства.

Автор благодарен сотрудникам кафедры инженерной и экологической геологии МГУ З. А. Кривошеевой, Е. Н. Коломенскому, В. Н. Соколову, В. Г. Шлыкову, Н. А. Румянцевой, Е. В. Свешниковой, которые помогли выполнить специальные исследования, а также сотрудникам кафедр кристаллографии, геохимии, гидрогеологии МГУ, оказавшим содействие в выполнении работы. Искренне признателен автор С. Д. Воронкевичу, К. А. Горбуновой, Л. А. Евдокимовой, С. Н. Емельянову, Р. С. Зиангирову, Г. С. Золотореву, Н. А. Ларионовой, Л. А. Молокову, Е. Н. Огородниковой, В. И. Сергееву, И. П. Тейшовой, Т. Г. Шимко за советы и помощь в ходе выполнения работы. В техническом оформлении книги неоценимую помощь оказали С. В. Казакевич и А. В. Денисов, а также А. Купер (Британская геологическая служба, Великобритания), Н. В. Черемных и Е. А. Хайрулина.

ВВЕДЕНИЕ

Наличие в основании плотин растворимых пород создает условия для развития карста, что может привести к катастрофическим последствиям. Активизация карста в основании плотин может быть связана со специфическими причинами — увеличением трещиноватости вследствие фильтрационных деформаций, выветривания пород в процессе строительства [106]. Определенную роль играет увеличение растворимости пород под действием нагрузки от сооружения [112]. Растворение гипса и других солей, содержащихся в дисперсных породах, может повлечь за собой суффозионные явления [115, 154]. По нашим подсчетам гипс встречается в основании более чем 50 плотин. Каменная соль находится в основании Рогунской и Нурекской ГЭС на р. Вахш в Таджикистане.

Интенсивность растворения пород в том случае, если фильтрационный поток способен их растворять, определяется скоростью этого потока. Одним из способов снижения скорости фильтрации в основании гидротехнического сооружения является создание противофильтрационной завесы. В скальных трещиноватых породах такие завесы создаются путем инъекции цементных и глиноцементных растворов, которые позволяют снизить удельное водопоглощение до 0,1 — 0,05 л/мин. Более низкие значения получить не удастся, ввиду того что цементные суспензионные растворы не могут проникать в трещины с раскрытием менее 0,1 мм. Как показала практика эксплуатации Камской ГЭС, в основании которой залегают гипсоносные породы, при таком остаточном удельном водопоглощении имело место растворение гипса, что привело к падению гашения напора на цементационной завесе на отдельных участках до 2 - 4 при проектной величине 33 %. Вследствие этого коэффициент устойчивости плотины на сдвиг вышел за критическую отметку.

Для повышения плотности противофильтрационных завес используются химические гелеобразующие растворы, которые обладают проникающей способностью, близкой по значению к воде. Такой раствор, называемый щавелевоалюмосиликатным, был разработан коллективом проблемной лаборатории геологического факультета МГУ для доуплотнения цемзавесы в основании Камской ГЭС. Раствор готовится из двух составляющих — силиката натрия и отвердителя, представляющего собой водный раствор сернокислого алюминия и щавелевой кислоты [18]. В результате использования раствора удельное водопоглощение на завесе не превышает 0,005 л/мин. Это в свою очередь привело к увеличению гашения напора на завесе и повышению устойчивости плотин до безопасного уровня.

Использование химических реагентов для инъекционных работ поставило вопрос об их воздействии на растворимость гипса. Такое воздействие,

помимо непосредственного контакта завесы с породой, происходит и за пределами зоны закрепления. Последнее вызвано тем, что при инъекции химических гелеобразующих растворов периферийная часть заканчиваемого объема разбавляется водой и не образует геля. Под действием фильтрационного потока эта часть раствора сносится за пределы завесы и претерпевает дальнейшее разбавление в ходе движения, в результате чего значительная площадь поверхности гипса контактирует с растворами различной степени разбавления. Кроме этого, на гипс воздействуют компоненты инъекционного раствора, переходящие в фильтрационный поток из геля под действием процесса диффузии.

В работе детально рассмотрено влияние изменившейся геохимической обстановки на растворимость гипса и фильтрационные параметры завесы и пород основания плотины, т.е. те факторы, которые в конечном счете определяют безопасность плотины.

Результаты применения щавелевоалюмосиликатного раствора на Камской ГЭС позволяют рекомендовать данный раствор для широкого применения при создании противофильтрационных завес в породах, содержащих гипс.

1. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЙОНА СТВОРА КАМСКОЙ ГЭС

1.1. Геологическая характеристика района

Камская ГЭС построена в 1954 г. ниже впадения р. Чусовой в р. Кама и в настоящее время находится в черте г. Перми. Расчетный напор плотины 21 м, ее длина 2,5 км. Водосливная бетонная гидроэлектростанция длиной около 400 м расположена в русле реки около ее крутого правого берега.

Район прилегает к восточной окраине Восточно-Европейской платформы, граничащей с Предуральским краевым прогибом. Створ плотины находится в северной части синклинали, разделяющей Краснокамско-Полазнинский вал и Лобановскую валообразную зону. Ось синклинали погружается на юго-запад. На участке плотины породы падают моноклинально вниз по течению реки (рис. 1.1.).

В зону влияния сооружения входят шешминский (P_{2ss}) и соликамский (P_{2sl}) горизонты уфимского яруса верхней перми, залегающие на иренском горизонте кунгурского яруса нижней перми (P_{1ir}). Эти отложения завершают толщу палеозойских отложений мощностью 1800-2300 м (III). Четвертичные отложения в основании бетонной плотины отсутствуют и в настоящей работе не рассматриваются.

Шешминский горизонт сложен фациально изменчивыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами, которые ниже сменяются породами соликамского горизонта — известняками, мергелями, доломитами с линзами гипса. Иренский горизонт состоит из гипсоангидритовых и известняково-доломитовых пачек и является региональным водоупором. Самой верхней является лунежская пачка гипсов и ангидритов.

В Пермском Приуралье пермские карбонатно-сульфатные отложения, в основном иренского горизонта, закарстованы. Развитие карста определяется условиями залегания карстующихся пород в разрезе. В районе створа плотины эти отложения перекрыты некарстующимися слабодоупорничаемыми в вертикальном направлении породами, что препятствует развитию карста.

В северном направлении происходит поднятие кровли пород иренского горизонта и в районе Чусовского мыса Камского водохранилища в 400-500 м от створа плотины они залегают на небольшой глубине. До создания водохранилища в нижней части крутого камского берега под отложениями соликамского горизонта обнажались гипсы иренского горизонта. Чусовской мыс с активным карстом входит в состав Полазнинско-Шалашнинского карстового района [96]. После создания водохранилища отмечалась акти-

визация карста. Здесь развиты многочисленные воронки, котловины, карстовые овраги, рвы, колодцы и пещеры.

Проявлялся карст ниже русел рек в зоне подрусловой циркуляции. Вблизи устья р. Чусовой в гипсах лунезжской пачки были вскрыты полости с вертикальным поперечником до 7,6 м в интервале глубин 13–38 м [44, 97].

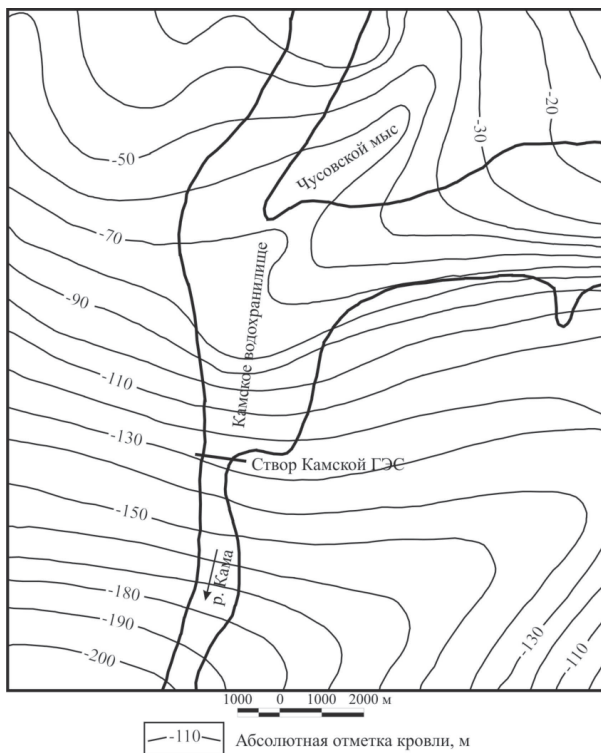


Рис. 1.1. Схематическая структурная карта по кровле артинского яруса (P_{ar}) района Камской ГЭС

Литологическая характеристика пород основания Камской ГЭС дана А. А. Турцевым [157, 158], А. М. Кузнецовым [84, 85], Д. П. Прочуханом и др. [125], Г. К. Маменко [98, 99] и другими исследователями в связи с инженерно-геологическими изысканиями для строительства плотины. Для уточнения литологии и, в частности, гипсоносности пород, находящихся в зоне ведения инъекционных работ, автором были изучены наиболее характерные образцы керна инъекционных и контрольных скважин. Образцы исследовались в шлифах, под сканирующим электронным микроскопом

(Квикскан-107), рентгенометрически, проводился химический анализ их.

Основанием бетонной плотины служат следующие породы, описание которых дается сверху вниз.

Непосредственно под плотиной залегают песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки шешминского горизонта мощностью 5-10 м. Наиболее распространены аргиллиты (местное название ваппы), реже — алевролиты. Известняки и песчаники имеют подчиненное значение в разрезе (рис. 1.2.). Аргиллиты серого, зеленоватого, коричневого и темно-коричневого цвета легко разрушаются при потере естественной влажности по криволинейным поверхностям. При участии З. А. Созыкиной производилось петрографическое изучение шлифов, описание которых приведено ниже.

Алевритистый известковистый аргиллит. Структура породы алевропелитовая, с размером алевритовых частиц 0,01-0,05 мм. Алевритовая примесь составляет 10-20 % породы, располагается в ней беспорядочно, таблитчатые зерна — обычно взаимно-параллельно. Алевритовая примесь представлена табличками плагиоклазов, частично замещенных карбонатом, остроугольными обломками кварца, глауконитом, чешуйками гидрослюда, мусковита, гидробиотита. Известковая примесь (10-15 %) распределена в породе беспорядочно в виде отдельных зерен. Основная масса породы (60-70 %) представлена глиной бурого цвета, вероятно, глауконит-хлоритового состава с примесью мелкозернистого карбоната.

Алевролит известково-глинистый. Структура породы пелитоалевритовая, с размером обломочных зерен от 0,05 до 0,1 мм (крупный алеврит). Порода состоит на 40-50% из обломков, сцементированных карбонатно-глинистым, базальным цементом. Обломки представлены округлыми зернами глауконита, таблитчатыми зернами полевого шпата (плагиоклазы), нередко значительно разрушенными и замещенными частично карбонатом. В качестве обломков отмечается также кварц, реже мусковит, хлорит, гидромусковит, обломки кремнистых пород, гидробиотит. Аутигенная примесь представлена карбонатом, составляющим до 10-20 % породы и пиритом. Цемент глинистый микрочешуйчатый. Текстура породы беспорядочная.

Ниже по разрезу залегают преимущественно карбонатные породы соликамского горизонта мощностью 40-45 м. В процессе изысканий они были разделены на 6 пластов. Это деление носит условный характер из-за фациальной изменчивости горизонта. Наиболее детально будут охарактеризованы 4 верхних пласта, так как они являются объектом закрепления.

Первый пласт мощностью 4-5 м представлен плитчатыми известняками. Известняк коричнево-серый, кремнестый. Изучение шлифов показало, что порода представляет мелкозернистую плотную массу с редкими вкраплениями агрегатов более крупных кристаллов кальцита. Местами встречаются выделения кальцита в форме раковин. Изредка попадаются

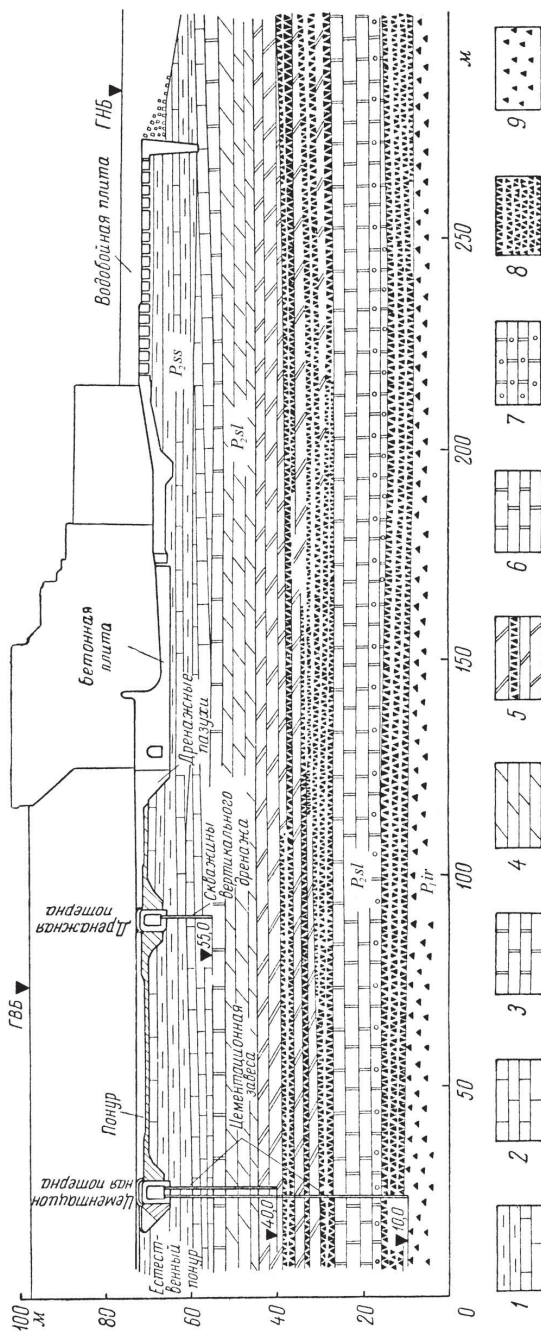


Рис. 1.2. Геологический разрез основания Камской ГЭС [89]. Р_{ss} – шешминский горизонт;

1 – аргиллиты, алевролиты с прослоями известняков; $P_{\Sigma I}$ – соликамский горизонт; 2 – известняки, 3 – доломиты, 4 – мергели, 5 – мергели и доломиты с прослоями и линзами гипса, 6 – доломиты, 7 – доломиты глинистые; $P_{\text{Гир}}$ – иренский горизонт; 8 – гипсы, 9 – ангидриты

кристаллики дисперсного гипса и мельчайшие зерна пирита. Известняк пронизан редкими, но сравнительно крупными порами. Пласт содержит прослой доломита, гипса.

Второй пласт светло-серых доломитов мощностью 2,5-3,5 м содержит прослой доломитовых и известковых мергелей, гипса. Доломит в шлифе представляет собой однородную мелкозернистую массу, пронизанную кристалликами дисперсного гипса. Глинистое вещество отсутствует. Встречаются тонкие прожилки гипса. Структура мергеля микрозернистая (доломит), пелитовая. В мергеле отмечается обильная органика, редкие чешуйки мусковита, мелкие зерна гипса, также подчеркивающие слоистость. Текстура породы слоистая.

Третий пласт известковистых и доломитовых мергелей мощностью 6-8 м содержит прослой гипса толщиной до 1 см. Мергель, как показало изучение в шлифах, имеет микрозернистую алевролитовую структуру. В качестве примесей в нем отмечаются алевритовые зерна кварца, глауконита, чешуйки мусковита, включения гипса.

Четвертый пласт переслаивающихся глинистых доломитов, мергелей с прослоями и линзами гипса имеет мощность 11-19 м. Приведем описание шлифа породы, которая представляет собой переслаивание доломито-известкового мергеля с известковистым алевролитом. Структура микрозернисто-алевропелитовая и алевропелитовая (известковистый алевролит). Мергель состоит из кальцита (30-40 %), доломита (10-20 %) глинистой (30-40 %) и алевритовой (10-15 %) примесей. Зерна кальцита и доломита имеют размер от 0,006 до 0,018 мм. Алевритовая примесь представлена глауконитом, полевым шпатом, кварцем, мусковитом. Отдельные пластические зерна замещаются монокристаллами карбоната. В качестве аутигенного минерала довольно часто встречается пирит, особенно на границе пород. Контакт пород — от резкого до постепенного. Мергель, обогащаясь алевритовой примесью, переходит в алевролит, состоящий из пластического материала (40-50 %) и доломитокальцитового цемента базального или порового типа. Обломочный материал (0,05-0,1 м) состоит из округлых светло-зеленых, буровато-зеленых зерен глауконита, угловатых зерен кварца, таблитчатых полевых шпатов, чешуйчатых гидрослюд, гидрохлоритов. Часто встречается аутигенный пирит, возможно, по глаукониту. Структура породы слоистая.

Пятый пласт — глинистые доломиты, темно-серые, тонкослоистые, мощность около 9 м. Доломиты характеризуются наличием пор размером до 1 мм, которые иногда заполнены доломитовой мукой, гипсом.

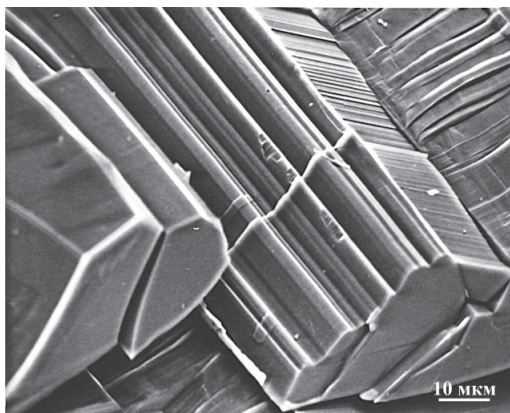
Шестой пласт — полосчатые доломиты мощностью около 3,5 м, содержат дисперсный гипс.

Залегающие ниже ангидриты лунежской пачки иренского горизонта являются водоупором. В долине р. Камы ангидриты в кровле подверглись гидратации и превратились в гипс.

Гипсоносность пород. Исследованию гипсоносности пород основания Камской ГЭС посвящены работы А. М. Кузнецова [84, 85] и других исследователей [158]. В дополнение к литературным материалам было проведено изучение керна скважин под сканирующим электронным микроскопом.

Различие форм гипса в основании плотины связано с его различной генетической природой. Согласно имеющимся представлениям [85] накопление сульфата кальция в процессе седиментогенеза на рассматриваемой площади происходило циклически. Выделено четыре цикла, характеризующиеся сменой карбонатных отложений сульфатными, сопровождавшейся увеличением солёности бассейна от нормальной до очень высокой. Для последнего цикла, к которому относятся породы соликамского горизонта, характерны глинисто-карбонатные отложения, накопление которых происходило в сильно опресненном бассейне. Периодические изменения солёности бассейна приводили к ритмичному отложению осадков, что обусловило их слоистость, наблюдаемую визуально и при просмотре шлифов. Как считает А. А. Турцев [158], кристаллизация гипса в виде гнезд и в дисперсной форме происходила одновременно с кристаллизацией карбонатов и отложением глинистого вещества.

По мнению А. М. Кузнецова [85], наряду с сингенетическим отложением сульфатов кальция в этой толще, формировались прослои волокнистого гипса (селенита) в результате диффузии сульфатов в богатые кальцием илистые массы. Волокнистые кристаллы гипса росли параллельно друг другу в вертикальном направлении. Изучение гипса под сканирующим микроскопом показало, что волокна гипса имеют горизонтально-слоистое строение (рис. 1.3.), что можно объяснить ритмическим поступлением вещества.



Подчиненное распространение в породах соликамского горизонта имеют тонкие секущие прожилки вторичного гипса, заполнившего трещины вследствие кристаллизации из пересыщенных сульфатом кальция водных растворов.

Рис. 1.3. Микростроение волокон гипса-селенита

Породы основания ГЭС имеют неодинаковую загипсованность по вертикали. Наименее загипсованы отложения шешминского горизонта – до 1,3 % (рис. 1.4; табл. 1.1). Гипс, как правило, находится в рассеянном (дисперсном) состоянии и невидим невооруженным глазом. Под электронным микроскопом в аргиллите (рис. 1.5) и алевролите гипс наблюдается в виде удлиненных кристаллов плохой сохранности. Реже он встречается в виде кристаллов размером до нескольких сантиметров. На рис. 1.5 показан такой кристалл и его фрагмент.

В сульфатно-карбонатной толще в целом наблюдается увеличение содержания сульфата кальция вниз по разрезу (рис. 1.6). Наибольшее количество гипса приурочено к доломитам, где среднее его содержание составляет 15 %, наименьшее – к мергелям (3 %) [85].

Таблица 1.1. Содержание гипса в породах основания Камской ГЭС [99]

Пласт	Мощность, м	Форма распространения гипса	Среднее содержание гипса, % по весу
Аргиллиты и алевролиты	5-7	дисперсный, отдельные кристаллы до 5 м	1,3
Известняки плитчатые	4-5	дисперсный	2,0
Доломиты	2,5-3	мелкие включения, прослой до 0,5 м	15,9
Мергели известковистые	6-8	дисперсный, заполнитель трещин	3,1
Гипсоносные мергели и доломиты	11-19	прослой, линзы суммарной мощности около 9,5 м	35,2
Доломиты глинистые	9,0	дисперсный	4,9
Доломиты полосчатые	3,5	дисперсный	12,6
Гипс	5,0	-	100
Ангидрит	115	-	-

Наиболее распространенными являются прослой волокнистого гипса (рис. 1.3) мощностью от долей миллиметра до 0,5 м. Количество их значительно, например, на 10 см керна насчитывается до 50 слоев. Мощность слоев выдержана на значительном расстоянии. Контакт гипса с вмещающими породами ровный (рис. 1.7 а), при раскалывании по нему образуются гладкие поверхности.

Рассеянный гипс встречается в различных формах: от микроскопических кристаллов и их сростков (рис. 1.7 б, в) до гнезд и линз, образованных беспорядочно ориентированными кристаллами с примесью вмещающих пород (рис. 1.7 г).

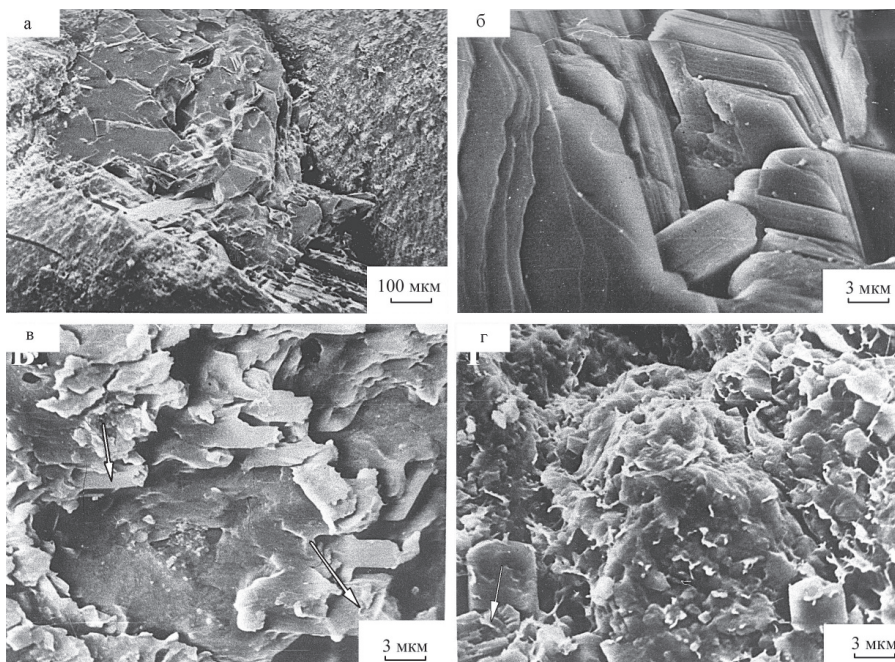


Рис. 1.5. Гипс в породах шешминского горизонта: а, б — кристалл в аргиллите, дисперсный гипс; в — в аргиллите; г — в алевролите.

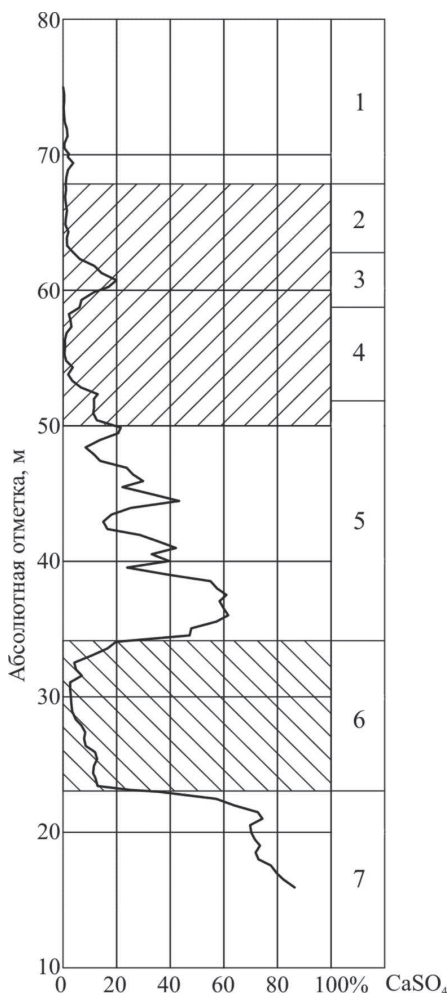
Скол перпендикулярный напластованию

Трещиноватость пород. Породы на участке створа плотины характеризуются неоднородной трещиноватостью. На фоне тектонической трещиноватости получили развитие трещины, связанные с гидратацией ангидрита [157], а также с разгрузкой пород вследствие речной эрозии. Определенное влияние на характер трещиноватости оказали как процессы растворения гипса, так и отложение этого минерала в трещинах.

Трещиноватость пород в период инженерно-геологических изысканий для строительства изучалась в горных выработках и с помощью опытно-фильтрационных работ — откачек и нагнетаний. Установлено, что в породах шешминского горизонта развиты крутопадающие трещины, простирающиеся параллельно направлению длины реки. Наиболее трещиноваты песчаники и известняки, в меньшей степени — более глинистые разности пород, в которых развиты волосяные трещины. Вниз по разрезу трещиноватость затухает.

Породы соликамского горизонта разбиты трещинами, простирающимися в меридиональном направлении. Для этой толщи характерны локальные участки с высокой степенью трещиноватости, которая уменьшается

по направлению погружения пластов пород и в сторону бортов долины. Следует отметить, что в обоих горизонтах встречена горизонтальная трещиноватость [98].



Гидрогеологическая обстановка, существовавшая в естественных условиях, в значительной степени изменилась после строительства ГЭС и в процессе ее эксплуатации. Поэтому при ее рассмотрении целесообразно выделить три этапа: первый — до создания водохранилища (1954 г.); второй — с 1954 г. до конца 70-х гг., характеризующийся изменением гидродинамической обстановки и недостаточно эффективной работой противофильтрационных устройств в новых условиях; третий — с начала 80-х гг., когда отмечается изменение гидрогеологических условий после доуплотнения цемзавесы силикатным раствором. В данном разделе будет рассмотрена обстановка, которая была в естественных условиях (первый этап). Два других этапа будут освещены в подразделе 1.2.2 и в разделе 5.

Гидрогеологические условия рассмотрены в работах А. Е. Орадовской, В. П. Зверева, Г. К. Маменко [64, 98, 116]. В основании ГЭС выделены три водоносных горизонта: шешминский, верхнесоликамский и нижнесоликамский. Пологопадающие в сторону нижнего бьефа пласты пород

Рис. 1.6. Содержание сульфата кальция в породах основания Камской ГЭС [85]: 1 — песчано-глинистые отложения шешминского горизонта; 2-6 — отложения соликамского горизонта: 2 — плитчатые известняки; 3 — доломиты; 4 — известковистые мергели; 5 — гипсоносные мергели и доломиты; 6 — глинистые доломиты; 7 — гипсы и ангидриты иренского горизонта. Штриховкой показаны водоносные горизонты

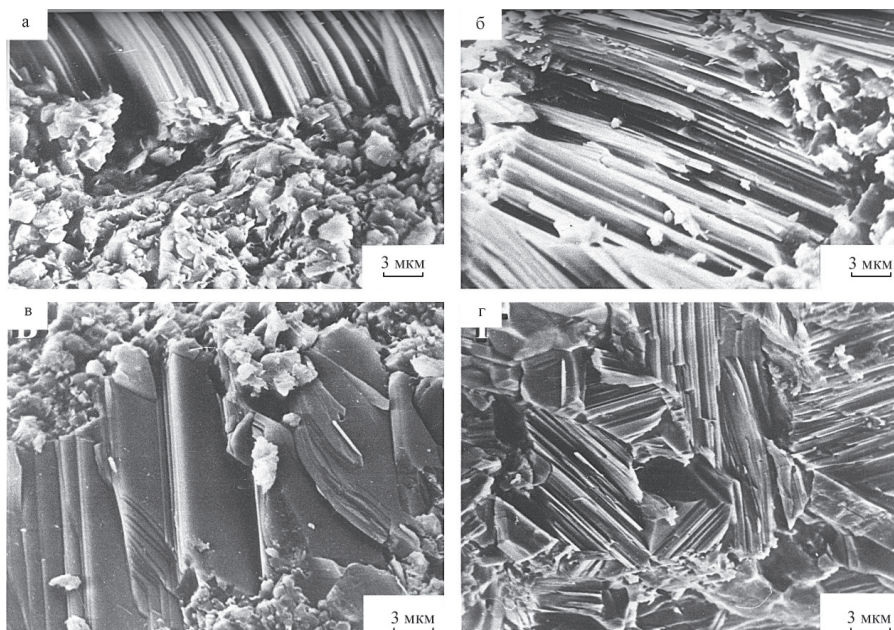


Рис. 1.7. Гипс в породах соликамского горизонта: а — контакт гипса-селенита с доломитовым мергелем; б, в — включения гипса в доломитовом известняке; г — гнездо гипса в доломитовом мергеле; а, г — скол перпендикулярный; б, в — скол параллельный напластованию

выклиниваются и последовательно обнажаются в верхнем бьефе. Район выклинивания пород шешминского и соликамского горизонтов площадью около 7 км, расположенный в 0,5 км от створа плотины, является областью питания верхнесоликамского и нижнесоликамского водоносных горизонтов. Горизонты являются напорными, уровни подземных вод в них были на 2-3 м выше уровня реки, вследствие чего происходила разгрузка этих вод в долину реки. Такой тип относится к субаквальной разгрузке [183]. По мере погружения пород снижается их трещиноватость и водоносность. Подземные воды оказываются в своеобразном мешке, открытом на участке выхода пород и практически закрытом в нижнем бьефе [116].

Шешминский водоносный горизонт приурочен к менее глинистым разностям шешминских отложений. Водупорными породами служит слой аргиллитов, залегающих в нижней части разреза. Мощность этого слоя колеблется в пределах 1,5-3,5 м [98]. В естественных условиях этот горизонт имел напор, который устанавливался на уровне реки. Породы горизонта характеризуются резкой фильтрационной анизотропией. Они хорошо про-

ничаемы по направлению вдоль реки, менее проницаемы — поперек нее и весьма трудно проницаемы в вертикальном направлении. Фильтрационные характеристики толщи даны в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Фильтрационные свойства пород основания
Камской ГЭС [98]

Пласт	Средняя глубина залегания кровли пласта, м	Удельное водопоглощение, л/мин		Средний коэффициент фильтрации, м/сут
		максимальное	среднее	
Аргиллиты и алевролиты	0	-	-	0,5-1
Известняки плитчатые	6	1,25	0,09	0,3
Доломиты	10	0,78	0,2	0,3
Мергели известковистые	13	0,91	0,3	0,6
Гипсоносные мергели и доломиты	20	0,14	0,01	0,009
Доломиты глинистые	37	0,56	0,02	0,3
Доломиты полосчатые	46	-	-	0,02
Гипс	50	0,0	0,0	0,0
Ангидрит	55	0,0	0,0	0,0

Воды этого горизонта имели сульфатно-кальциевый и сульфатно-натриевый состав с минерализацией 0,3-0,4 г/л в верхней части и 4-7 г/л в нижней части.

Верхнесоликамский водоносный горизонт формируется в пластах плитчатых известняков, доломитов и известковистых мергелей. Горизонт напорный, водоупорной кровлей служат шешминские отложения, водоупорной подошвой — пласт гипсоносных мергелей и доломитов мощностью 11-19 м. Эти породы водоупорны только в районе створа плотины на протяжении 1,5-2 км. В верхнем и нижнем бьефе верхнесоликамский горизонт сливается с нижнесоликамским.

Горизонт имеет неоднородную водообильность. Гидравлическое опробование показало, что на отдельных участках значения удельных водопоглощений во много раз превышают среднее (табл. 1.2). По данным моделирования [33] в основании бетонной плотины выделены 12 блоков с проводимостью в пределах от 0,2 до 28,4 м²/сут. С неоднородной обводненностью и существованием зон сосредоточенной фильтрации связано резкое изменение химического состава подземных вод на сравнительно небольшом участке. Здесь были встречены гидрокарбонатные, сульфатные и хлоридные воды с минерализацией от 1,3 до 87 г/л.

Нижнесоликамский горизонт, формирующийся в пластах глинистых и полосчатых доломитов, также напорный. Положение уровней в этом вышележащем горизонте было на 1-3 м выше уровня реки. Водоупорная кровля горизонта — гипсоносные мергели и доломиты, водоупорная подошва — мощная толща гипсов и ангидритов. Горизонт также имеет неоднородное

строение. Коэффициенты фильтрации изменяются от значений близких к нулю до 1,15 м/сут. По химическому составу воды представляют собой сероводородные рассолы, насыщенные сернокислыми солями кальция и магния, с высокой концентрацией хлоридов кальция и магния. В водах отмечается бром до 360 мг/л, йод до 25 мг/л, аммоний, азотметановые газы. В формировании химического состава этих вод принимали участие рассолы, мигрирующие по трещинам из более глубоких палеозойских пород [116].

Температура верхнесоликамского и нижнесоликамского водоносных горизонтов практически постоянна и составляет 6–7°С. Температура вод шешминского горизонта колеблется в пределах 3–13°С.

1.2. Необходимость проведения дополнительных мероприятий по защите гипса от растворения

1.2.1. Эффективность работы противофильтрационных устройств

При проектировании Камской ГЭС рассматривались различные варианты защиты гипсоносных пород от растворения. Одним из вариантов была долговечная мерзлотная завеса толщиной 10 м, заглубленная до водоупорных гипсов и ангидритов [156]. Предлагалось также обрабатывать гипс различными соединениями с целью создания на его поверхности нерастворимых пленок [13, 63], отсыпать соли в начале водонепроницаемого контура сооружения [116].

Учитывая особенности гидрогеологических условий в районе створа, целесообразными были признаны такие мероприятия, которые позволили бы максимально сохранять естественную гидрохимическую обстановку после наполнения водохранилища. Для этой цели были созданы водонепроницаемый понур в верхнем бьефе протяженностью 110 м, цементационная завеса в начале понура и вертикальный глубинный дренаж примерно в его середине.

Цементационная завеса состоит из трех частей: правобережная длиной 200 м, русловая и левобережная длиной 70 м, выполненная вдоль устья. Русловая завеса трехрядная, расстояние между скважинами по верхнему и низовому рядам 2 м, по среднему ряду 1 м, расстояние между рядами 1 м. Завеса создана до пласта водоупорных гипсоносных мергелей и доломитов, скважины верхнего ряда через каждые 4 м доведены до кровли ангидритов. Цементация производилась сверху вниз при давлении 1–10 атм, при этом израсходовано 7500 т цемента. В 1960–1961 гг. произведена дополнительная цементация на русловом участке. Для этого использовался сульфатостойкий и частично портландский цемент, при дополнительной цементации в него добавлялось до 30 % глины.

Вертикальный глубинный дренаж состоит из одного ряда скважин глубиной около 15 м, расположенных через 5 м. Скважины заполнены гравийно-галечным материалом и соединены общим водоотводящим коллектором.

Завеса предназначалась для снижения фильтрации пресных вод из водохранилища. Предполагалось, что профильтровавшиеся через завесу воды, не насыщенные сульфатом кальция, будут перехватываться дренажем. Оба эти мероприятия в сочетании с понуром должны были снизить напоры в шешминском и верхнесоликамском водоносных горизонтах и обеспечить условия для разгрузки неагрессивных к гипсу вод из нижележащих горизонтов. По расчетам агрессивные к гипсу подземные воды не должны были достигать загипсованной толщи [101].

По проекту плотность руслового участка завесы по удельному водопоглощению определена в 0,01 л/м. В процессе работы выяснялось, что такой плотности достигнуть не удастся и была установлена контрольная плотность — 0,05 л/мин. Однако на отдельных участках не удалось достигнуть такой плотности даже после повторной цементации. Это обстоятельство связано с тем, что цементные суспензионные растворы не могут проникать в трещины с раскрытием менее 0,1 мм. Созданная завеса не смогла обеспечить проектное значение напора, определенное в 27 %. Со временем завеса теряет свою эффективность.

На отдельных участках в верхнесоликамском водоносном горизонте, для которого характерно высокое содержание гипса, гашение напора на завесе упало с 20 % в 1961 г. до 1 % в 1973 г. В некоторых пьезометрах в районе завесы возросли удельные дебиты. Контрольные скважины, пробуренные в 1968 г. в теле цемзавесы, показали, что водопроницаемость плитчатых известняков по данным гидроопробования возросла с 0,058 до 0,4 л/мин, в пласте доломитов составила 0,1-0,24 л/мин, в пласте известковистых мергелей — 0,155 л/мин [17, 53, 76].

Таким образом, практика показала, что в условиях Камской ГЭС создание завесы только с применением цементного раствора неэффективно, так как не удастся создать достаточной плотности завесы и с течением времени плотность завесы падает.

С 1961 г. производилось включение дренажа на сроки от нескольких часов до 224 дней в году. При работе дренажа происходит снижение уровней во всех водоносных горизонтах, причем в верхнесоликамском и шешминском оно достигает 6-7 м. Вследствие этого снижается противодавление и повышается коэффициент устойчивости сооружения. Однако главная цель — перехват опресненных вод — при работе дренажа не была достигнута. Возникли опасения, что появившиеся признаки растворения гипса в той или иной степени связаны с увеличением фильтрационного расхода в породах основания, вызванного работой дренажа. Поэтому было принято решение законсервировать дренаж.

1.2.2. Изменение гидрогеологических условий после создания плотины

После строительства плотины в основании Камской ГЭС произошли существенные изменения гидродинамических и гидрохимических условий, которые вызваны рядом факторов. Водохранилище вызвало изменение напоров подземных вод и фильтрацию из него пресных вод в основании сооружения. Определенное влияние оказали периодическое включение дренажа, уменьшение во времени эффективности цемзавесы, внедрение в массив большого количества цементного отжима при создании завесы, течи в потернах и др.

Контроль за изменением гидрогеологической обстановки с целью оценки сохранности гипса в основании сооружения производится с помощью сети пьезометров и скважин, заложенных в трех водоносных горизонтах. С 1955 г. гидроцехом Камской ГЭС ведется наблюдение за химическим составом воды, уровнями и дебитом скважин. Анализ материалов наблюдений позволяет проследить определенные изменения, произошедшие за время эксплуатации ГЭС.

В шешминском водоносном горизонте после строительства плотины в результате создания напора область разгрузки вод нижележащих горизонтов сместилась в сторону нижнего бьефа. Началось опреснение подземных вод, которое особенно интенсивно проявилось в районе правого берега. На некоторых участках величина сухого остатка снизилась с 2–3 г/л в 1958 г. до 0,2–0,5 г/л в 1973 г., содержание сульфат-иона существенно уменьшилось, содержание гидрокарбонатного иона увеличилось.

В верхнесоликамском водоносном горизонте после наполнения водохранилища уровни возросли и превышают естественный уровень на 3–6 м. В пределах верховой части понура напоры в этом горизонте ниже, чем в шешминском. Верхнесоликамский водоносный горизонт получает питание на этом участке как за счет минерализованных вод, разгружающихся из нижнесоликамского водоносного горизонта, так и за счет опресненных вод нижележащего горизонта [116].

В первые годы эксплуатации ГЭС в основании понура сформировались участки с опресненными подземными водами, недонасыщенными по гипсу, причем конфигурация их практически не меняется. По данным отдельных скважин минерализация вод снизилась с 2–4 до 0,5–1 г/л и появились гидрокарбонатные воды. Распространение вод различной минерализации вдоль оси завесы перед ее доуплотнением показано на рис. 1.8. Увеличилась водопроницаемость пород на отдельных участках. Так, пьезометр 225 в 1961 г. имел удельный дебит 0,037 л/с, а в 1965 г. он достиг 1,2 л/с. При проходке в 1966 г. скважины в 8 м от этого пьезометра в плитчатых извест-

ных имел место провал инструмента на несколько сантиметров. Величина коэффициента фильтрации оценена в 3,5 м/сут [17].

В нижнесоликамском водоносном горизонте существенных изменений не произошло.

К настоящему времени водоносные горизонты продолжают существовать раздельно как по гидрохимическому, так и по напорному режиму; химический состав вод показан на рис. 1.9 и 1.10. Наибольший напор под зданием ГЭС имеет нижнесоликамский водоносный горизонт, наименьший – шешминский, т. е. разгрузка подземных вод осуществляется в русло реки. Уровни всех водоносных горизонтов реагируют на колебания уровня верхнего бьефа.

Через три года после строительства ГЭС в подземных водах отмечено появление щелочных вод со значением рН до 12. Для многих скважин характерно периодическое повышение щелочности. Щелочные воды находятся главным образом вблизи цементационной потерны. По мнению А. М. Кузнецова, появление таких вод связано с внедрением в массив цементного отжима объемом примерно 62000 м³ с рН=12-13. Однако длительное существование щелочных вод, по-видимому, связано с другими процессами, например, с коррозией цементного камня тела завесы.

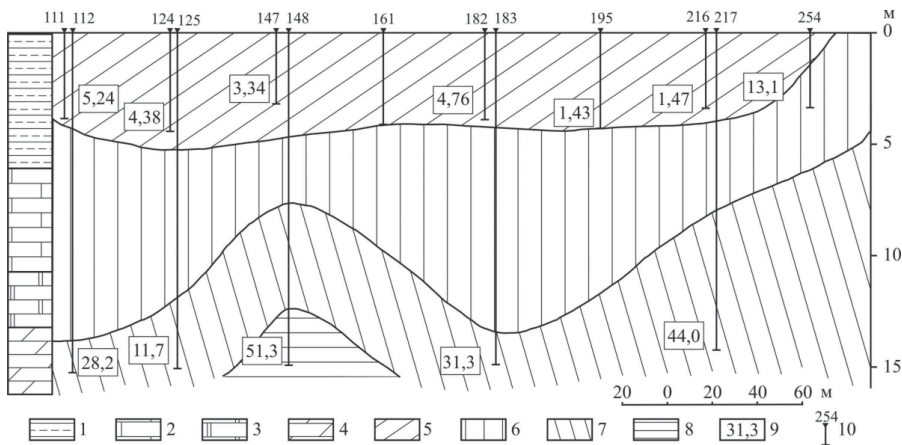


Рис. 1.8. Схематический гидрохимический профиль вдоль оси завесы до её уплотнения силикатным раствором (1974 г.): 1 – песчаники, аргиллиты и алевролиты (шешминский горизонт); 2 – известняки; 3 – доломиты; 4 – мергели (2-4 – соликамский горизонт). Минерализация подземных вод (г/л): 5 – менее 1; 6 – 1-5; 7 – 5-10; 8 – более 10; 9 – сумма содержания кальция и магния (мг-экв/л); 10 – пьезометр и его номер

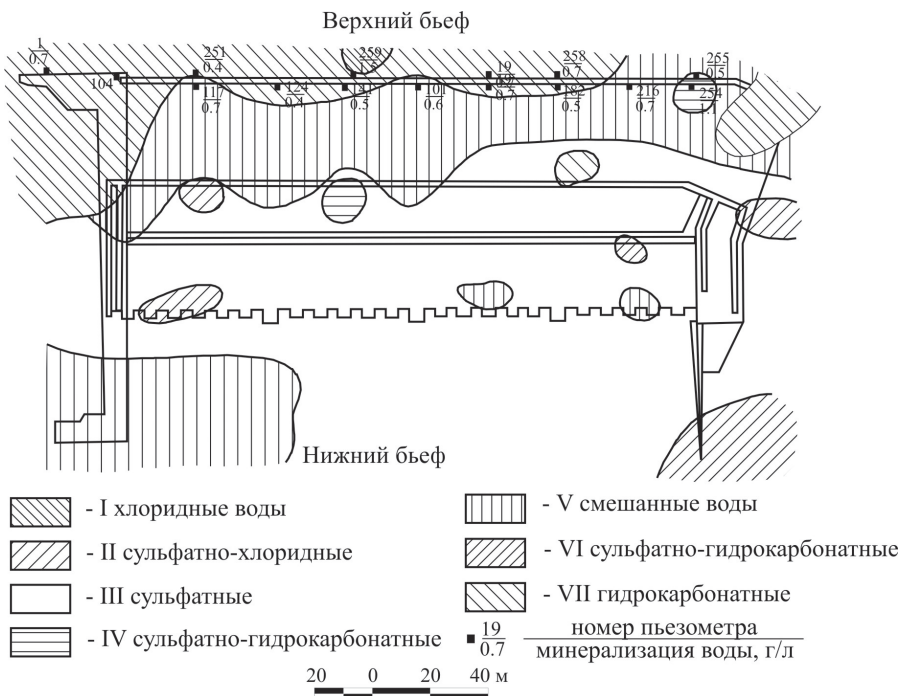


Рис. 1.9 Гидрохимическая карта шешиминского горизонта (август 1973 г.)

С 1958 г. в пьезометрах всех водоносных горизонтов отмечены газопро- явления. В состав газов входят: метан — от 3 до 86 %, азот — 8-91 %, серово- род и углекислый газ — 0,1-18 %, тяжелые углеводороды — до 2 %, водо- род — до 0,6 %. Как считает А. М. Кузнецов [86], газы имеют биогенное происхождение.

1.3. Доуплотнение цементационной завесы щавелевоалюмосиликатным раствором и схематизация постинъекционных условий

Данные режимных, гидрохимических и гидродинамических наблюде- ний свидетельствуют, что в основании ГЭС развиваются процессы опрес- нения подземных вод, происходит выщелачивание и растворение гипсо- носных пород. Эти процессы протекают достаточно медленно и пока не сказываются на работе сооружения. Предусмотренные проектом противо- фильтрационные мероприятия — цемзавеса и дренаж — оказались малоэф- фективными. Снижение во времени плотности завесы и изменение филь-

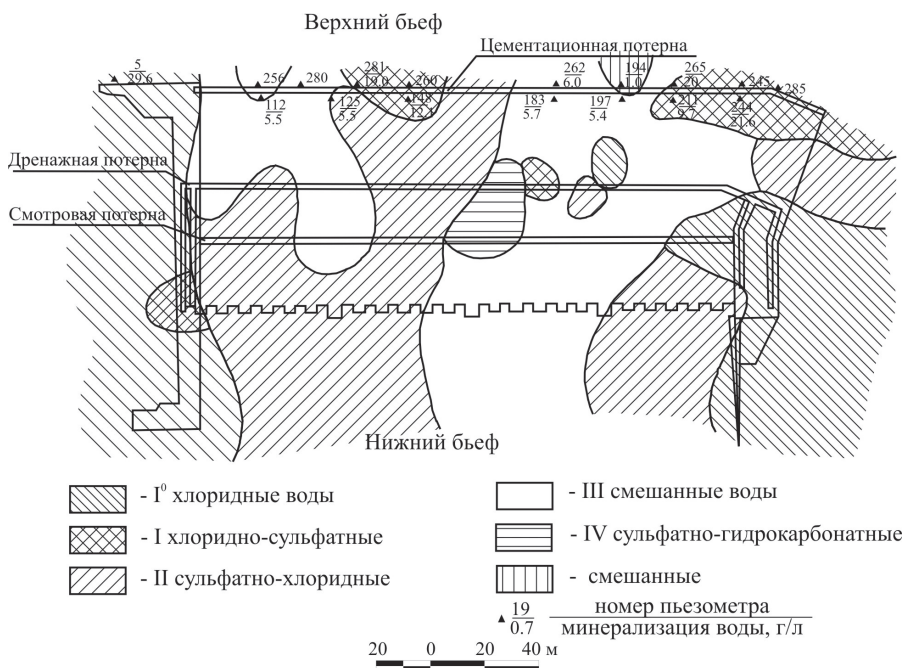


Рис. 1.10. Гидрохимическая карта верхнесоликамского горизонта (октябрь 1973 г.)

традиционных параметров толщи привели к увеличению противодействия и снижению устойчивости плотины. В первой секции в 1974 г. коэффициент устойчивости вплотную приблизился к минимально допустимому значению. В создавшихся условиях встал вопрос об уплотнении цемзавесы. Для этой цели предложен разработанный в Проблемной лаборатории геологического факультета МГУ С.Д. Воронкевичем и Л.А. Евдокимовой гелеобразующий щавелевоалюмосиликатный (ЩАС) раствор. Использование силикатного раствора для тампонирования трещиноватых грунтов в основании плотины в отечественной практике осуществлено впервые [18, 30].

Тампонажный эффект данного раствора достигается за счет образования геля из коллоидного раствора (золя) после его внедрения в массив путем инъекции. Раствор готовится из двух составляющих: силиката натрия (жидкого стекла) плотностью 1,19 г/см³ и комплексного отвердителя. Отвердитель представляет собой водный раствор сернокислого алюминия (50 г/л) и щавелевой кислоты (50 г/л). Время гелеобразования можно изменять соотношением жидкого стекла и отвердителя от нескольких минут

до нескольких часов. Для производства инъекций используют соотношение 100:46, при котором время гелеобразования составляет 1,5 часа. Такая продолжительность технологически удобна. Плотность ЩАС-раствора 1,14–1,15 г/см³, начальная вязкость 1,5–1,7 сП, причем она остается практически постоянной в течение большей части времени до момента гелеобразования. Такая низкая вязкость обеспечивает высокую проникающую способность раствора. В интервале температур 10–30° время гелеобразования раствора практически не меняется. Гель ЩАС-раствора, благодаря высокой адгезии, устойчив к воздействию напора подземных вод в трещинах, оставшихся после цементации во всех литологических разностях пород [136]. Некоторые другие свойства раствора рассмотрены в ряде работ [18, 30].

Доуплотнению, начатому в конце 1974 г., подверглась русловая часть цемзавесы протяженностью 465 м. Созданы две боковые завесы протяженностью 100 м каждая. Таким образом, завеса имеет П-образную форму. Инъекционные скважины расположены в один ряд, расстояние между ними 1,5 м, глубина 26 м, т. е. они заглублены на несколько метров в водоупор верхнесоликамского водоносного горизонта. Скважины обрабатываются в три очереди путем уменьшения расстояния между ними до проектного. Инъектирование ведется нисходящими зонами мощностью 3–7 м при давлении 5–15 кг/см². На участках с удельным водопоглощением более 0,1 л/мин предварительно проводилась цементация. При выполнении работ русловая завеса разбита на три участка. После завершения работ на участке разбуривались контрольные скважины, удельные водопоглощения в которых характеризовали достигнутую плотность завесы.

Для оценки изменения плотности завесы после инъекционных работ были построены профили водопроницаемости пород вдоль оси завесы для двух участков (рис. 1.11; 1.12). Профиль водопроницаемости пород до доуплотнения завесы строится по величинам удельных водопоглощений, определенных по скважинам первой очереди. Профиль водопроницаемости пород после доуплотнения завесы — по контрольным скважинам. Технологическая схема ведения работ предусматривала дополнительные инъекционные скважины в том случае, если удельное водопоглощение по данным контрольных скважин превышало 0,01 л/мин. После дополнительных работ водопроницаемость пород не определялась и, следовательно, она не нашла отражения на профиле. Таким образом, на профиле показана плотность завесы, достигнутая после работ при проектном шаге скважин 1,5 м, т. е. без учета эффекта, полученного за счет дополнительных работ.

Перед доуплотнением завесы наибольшую водопроницаемость имели породы шешминского горизонта и плитчатые известняки соликамского горизонта (рис. 1.11). У залегающих ниже доломитов и мергелей значения удельных водопоглощений были в 4–10 раз ниже. После доуплотнения за-

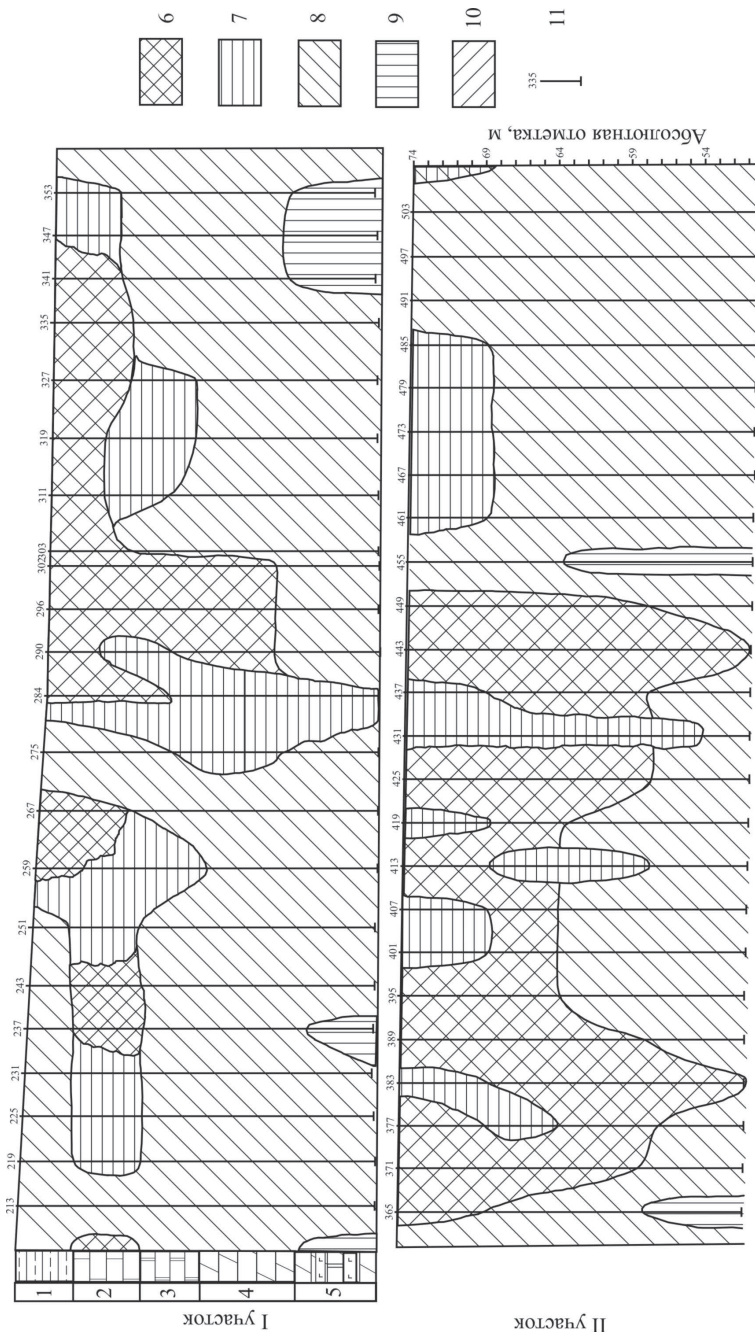


Рис. 1.11. Профиль водонослощций вдоль оси завесы до её уплотнения:

1 — аргиллиты, алевролиты; 2 — известняки; 3 — доломиты; 4 — мергели; 5 — переслаивание мергелей, доломитов, гипса; удельные водонослощения (л/мин.): 6 — 0,01; 7 — 0,01-0,05; 8 — 0,005-0,001; 9 — 0,001-0,0002; 10 — 0,0002; 11 — скважина и её номер

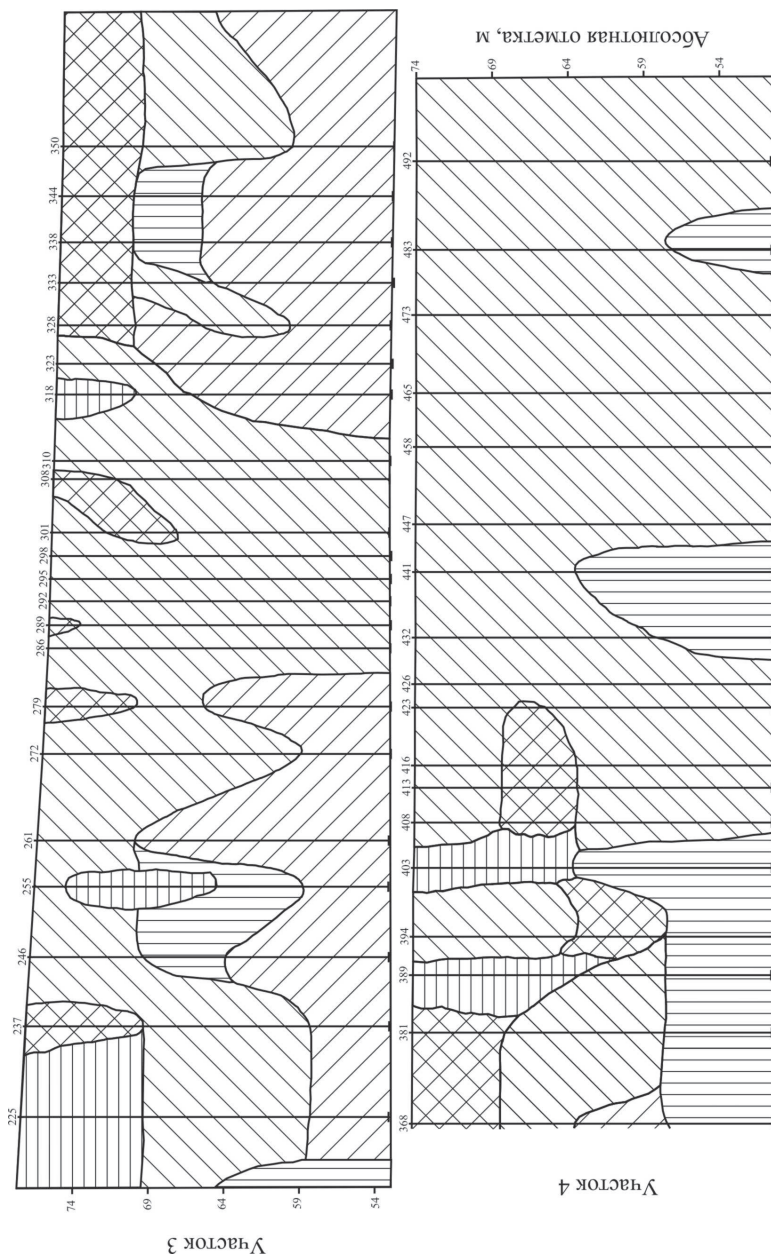


Рис. 1.12. Профиль водопоглощений вдоль оси завесы после её уплотнения ШАС раствором
(условные обозначения те же, что на рис. 1.11)

веса ЩАС-раствором значения удельных водопоглощений уменьшились (рис. 1.11). В верхних зонах, сложенных породами шешминского горизонта и плитчатыми известняками, среднее удельное водопоглощение составляет 0,005 л/мин, в нижних зонах – 0,002 л/мин. В нижних зонах сформировались участки, где по данным контрольных скважин удельное водопоглощение не фиксируется (менее 0,0002 л/мин).

Наличие остаточной проницаемости свидетельствуют, что в теле завесы затампонированы не все трещины. Коэффициент фильтрации завесы оценивается величиной $4,5 \cdot 10^{-3}$ м/сут [33], что существенно больше, чем коэффициент фильтрации нетрещиноватых пород (10^{-8} – 10^{-10} м/сут) и ЩАС-геля ($2,3 \cdot 10^{-6}$ м/сут) [56]. Причины остаточной проницаемости могут быть разные: наличие трещин, не пересекающих инъекционные скважины, тупиковых трещин [166], куда не проникает инъекционный раствор, несмыкание геля между соседними скважинами и др.

В результате проведенных работ возросли перепады напора на завесе и коэффициент устойчивости сооружения. По данным службы наблюдения Камской ГЭС гашение напора на русловой части завесы к 6 июля 1981 г. возросло по сравнению с 18 июля 1974 г. (до начала работ) в шешминском горизонте (в % к общему напору):

- в 1-й секции с 24 до 40,
- 2-й секции с 6 до 27,
- 3-й секции с 12 до 29.

В верхнесоликамском водоносном горизонте:

- в 1-й секции с 10 до 30,
- 2-й секции с 5 до 11,
- 3-й секции с 6 до 23.

В этот же период увеличился коэффициент устойчивости плотины на сдвиг:

- в 1-й секции с 1,30 до 1,46,
- 2-й секции с 1,45 до 1,53,
- 3-й секции с 1,35 до 1,51,
- 4-й секции с 1,51 до 1,65.

Следует отметить, что после завершения инъекционных работ указанные показатели увеличились во времени.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОСТИНЪЕКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

2.1. Взаимодействие техногенных растворов с грунтом в ходе инъекции

Инъекционное закрепление грунтов с целью повышения их прочности или снижения водопроницаемости нашло широкое применение в фундаментостроении, горном деле, гидротехническом строительстве. Практически на всех крупных плотинах этот способ применяется для создания противофильтрационных завес, причем для завес глубокого заложения он является единственным [2].

Метод инъекции как специфическая технология нагнетания под давлением различных жидких материалов и веществ [32] впервые был применен в 1802 г. французским инженером Ш. Берины для укрепления под водой цементным раствором кирпичной кладки. Во второй половине XIX в. инъекция цементных растворов нашла применение для закрепления трещиноватых грунтов при проходке шахтных стволов. В 1907 г. глубинная цементация применена в основании крупного гидротехнического сооружения — плотины Кротон высотой 72 м. В 1887 г. И. Езерски применил для закрепления грунтов последовательное нагнетание жидкого стекла и хлористого кальция. Метод, где в качестве отвердителя жидкого стекла использовался серноокислый алюминий, был запатентован Франсуа в 1911 г., однако в то время силикатизация не получила широкого распространения ввиду высокой стоимости и несовершенства технологии. С середины 20-х гг. XX в. инъекция химических растворов широко используется на практике. Наряду с силикатом натрия начинают использовать синтетические смолы с разнообразными веществами — отвердителями, добавками [2, 41, 186, 196]. Увеличение количества используемых химических реагентов вызвано следующими причинами: поисками путей повышения эффективности закрепления, необходимостью синтеза рецептур для специфических типов грунтов, возросшими возможностями химической промышленности и технологии инъекции.

Химические растворы нашли применение при создании противофильтрационных завес в дисперсных породах [2]. В России впервые такие растворы (силикат натрия с отвердителем - хлористым кальцием) применялись в 1933 г. при создании завесы в песчано-гравелистой толще основания Магнитогорской ГЭС. Таким способом было закреплено 400 м³ грунта [36]. В дальнейшем масштабы применения химических растворов существенно выросли. Например, при создании завесы в основании Асуанской плотины общий объем закаченных инъекционных материалов составил 680 000 м³, из них 68 000 м³ приходится на химический алюмосиликатный раствор [32].

В настоящее время в практике гидротехнического строительства помимо использования традиционного метода цементации накоплен небольшой опыт применения химических растворов для создания противотекучих завес в трещиноватых породах. Использование химических растворов, имеющих большую стоимость, является вынужденной мерой при наличии тонкотрещиноватых пород, цементация которых не дает нужного эффекта. Приведенные в табл. 2.1 примеры свидетельствуют о высокой эффективности химических растворов, обладающих высокой проникающей способностью. Раствор в ходе инъекции в той или иной степени взаимодействует с породами и подземными водами. Взаимодействие грунта с внедряемыми реагентами продолжается после окончания инъекции и достижения положительного эффекта, что может усилить или, в отдельных случаях, свести его на нет. На важность этого взаимодействия указывал в 1959 г. Е. М. Сергеев [138]. В его последующих работах [140], в том числе написанной совместно с С. Д. Воронкевичем и С. С. Морозовым [25], показана необходимость развития геолого-минералогического направления в технической мелиорации грунтов, позволяющего сознательно регулировать взаимодействие между грунтом и вносимыми в него веществами. Важным вкладом в эту область явились работы С. Д. Воронкевича [18, 23–35, 68, 134, 135], в которых сформулирован и развивается принцип геохимически оптимальных направлений в области синтеза растворов и гелей для закрепления грунтов.

Взаимодействие раствора с подземными водами и грунтом в ходе инъекции может привести к существенным изменениям свойств инъекционного раствора и повлиять на эффективность закрепления.

В процессе инъекции, благодаря явлению гидродинамической дисперсии, в периферийной части закачиваемого раствора происходит его разбавление подземными водами. В зоне разбавления раствора его концентрация меняется от исходной до нулевой. Уменьшение концентрации приводит к увеличению времени гелеобразования. С увеличением времени гелеобразования снижается прочность гелей [30, 72]. При больших разбавлениях гель не образуется вообще. В работах С. Д. Воронкевича, В. И. Сергеева [23, 29] доказана возможность применения решений уравнений теплопереноса [170] для расчета изменения концентрации инъекционного раствора в дисперсных грунтах. Они показали, что в ходе инъекции формируются зоны с различным физическим состоянием раствора и что эффективный радиус закрепления может существенно отличаться от радиуса распространения инъекционного раствора.

При больших скоростях фильтрации подземных вод (более 1000 м/сут), которые имели место, например, при строительстве Серебрянской ГЭС-2, ДнепроГЭС-2, Печенегского гидроузла и др., разбавление и снос потоком

Таблица 2.1. Применение химических растворов для тампонажа трещиноватых пород в основании плотин

Плотина	Породы основания	Раствор	Остаточное удельное водопоглощение, л/мин	Вид работ	Причины применения химического раствора	Литературный источник
Камская ГЭС (СССР)	мергели, доломиты, гипсы, известняки, аргиллиты, алевролиты	щавелево-алюмосиликатный	0,05–0	производственные	цементационная завеса потеряла эффективность	[18, 30]
Перепадная ГЭС-1 (СССР)	песчаники, глины, конгломераты	щавелево-алюмосиликатный	0,0035–0,0017	опытные	породы не поддаются цементации	[30]
Перепадная ГЭС-1 (СССР)	песчаники, глины, конгломераты	ФРЭС	0,016	опытные	породы не поддаются цементации	[48]
Рогунская ГЭС (СССР)	аргиллиты, алевролиты, песчаники, гипс, каменная соль	эпоксидная смола ТЭГ-1	0,003–0,01 среднее 0,007	опытные	необходима максимальная гидроизоляция соляного оголовка	[34]
Коунас-Форд (США)	граниты	АМ-9 (акриловый мономер и катализаторы)	близкое к 0	производственные	плотность цементной завесы недостаточна	[109]
Кайнджи (Нигерия)	граниты, алевролиты	резорцино-формальдегидная смола	близкое к 0	производственные	цементация неэффективна	[2]
Бу-Ханифа (Алжир)	трещиноватые песчаники, песчано-глинистые отложения	растворы на основе силиката натрия	-	производственные	-	[60]
Гриб (Алжир)	мергели и песчаники	растворы на основе силиката натрия	снижено на 98,3–99,6%	производственные	-	[60]
Фолда (Алжир)	известняки	силикат натрия и сернокислый алюминий	-	производственные	наличие трещиноватых пород	[60]
Фенгтан (Китай)	песчаники	полиуретановый	-	производственные	повышение качества цементной завесы	[187]
Ченцун (Китай)	брекчии и меланиты	полиуретановый	-	производственные	повышение качества цементной завесы	[187]

воды инъекционных растворов сильно затруднял тампонирувание пород. Для таких случаев были разработаны специальные растворы, например, на основе медно-аммиачного раствора целлюлозы, отвердителем которого является вода. Использование этого раствора позволило снизить скорости фильтрации воды до величин, при которых возможна цементация [149].

Взаимодействие компонентов подземных вод с инъекционным раствором в зоне разбавления может привести к преждевременному гелеобразо-

ванию и затруднить продвижение раствора в глубь массива. Исследованиями, проведенными Т. Т. Абрамовой, В. И. Сергеевым, С. Д. Воронкевичем [1, 134], установлено, что при закреплении растворами на основе силиката натрия грунтов, содержащих воды с минерализацией более 5–10 г/л, определяемой солями кальция и магния, в ходе инъекции происходит коагуляция раствора и выпадение хлопьевидного осадка. Для акрилсиликатных растворов содержание хлористых и сернокислых солей щелочноземельных металлов не должно превышать 20 г/л [32, 46].

Известен случай, когда силикатный раствор не отверждался вследствие проникновения загрязненных сточных вод в зону инъекции [192].

Работы ряда исследователей посвящены изучению взаимодействия инъекционного раствора с породами в процессе инъекции. При активном взаимодействии происходит изменение концентрации, состава, соотношения компонентов инъекционного раствора, что во многих случаях нежелательно.

Исследования С. Д. Воронкевича, В. И. Сергеева, В. М. Голоднова и др. [31] показали, что при закреплении песчаных грунтов силикатными растворами явление сорбции, снижающее концентрацию компонентов раствора вдоль радиуса инъекции, приводит к уменьшению прочности закрепления. Сорбция оказывает влияние при содержании в грунте физической глины более 2 % и существенно возрастает при наличии железистых и глинистых пленок, а также монтмориллонита.

С. Д. Воронкевич и В. Н. Кутергин [23, 88] исследовали изменения свойств щавелевоалюмосиликатного раствора при пропускании его через колонку, заполненную песками различного состава. Они установили, что после фильтрации резко меняются свойства раствора и образующегося из него геля, в том числе меняется микроструктура гелей.

Эффект однорастворной силикатизации лёссов в большой степени зависит от содержания в них водорастворимых солей [149]. При содержании гипса 1–2 % ускоряется процесс отверждения силиката. Когда его содержание превышает 5 %, этот процесс настолько интенсифицируется, что происходит резкое уменьшение времени гелеобразования и, следовательно, радиуса закрепления. В работе Т. Г. Шимко [171] отмечается, что присутствие в лёссовых грунтах монтмориллонита снижает в процессе инъекции коэффициент фильтрации вследствие набухания этого минерала в щелочной среде.

Р. И. Злочевская, Ф. Е. Волков, С. Д. Воронкевич, В. И. Дивисилова [68] показали, что при воздействии на глинистые и лёссовые грунты раствором щелочи происходят необратимые преобразования этих пород, ведущие к повышению их прочности. Исследованиями Р. С. Зиангирова и др. [67] установлено, что хлоридно-натриевые техногенные воды, содержащие органические кислоты, при воздействии на глинистые породы вызывают изменение их прочностных и деформационных свойств.

При закреплении карбамидными смолами грунтов, содержащих карбонаты, вследствие взаимодействия с ними отвердителя раствора увеличивается время гелеобразования и уменьшается прочность закрепления [108]. По данным Л. В. Гончаровой и Р. С. Зиангирова [66], добавка 5 % гипса к закрепляемому песку не уменьшает эффекта смолизации. Грунты, содержащие карбонаты, не поддаются закреплению кислыми растворами, так как при их взаимодействии выделяется газовая фаза, что затрудняет продвижение раствора.

Закрепленные грунты продолжают изменяться и после окончания инъекции. Такие изменения обусловлены взаимодействием продуктов искусственной цементации с породами, подземными водами под влиянием процессов, происходящих в самих цементирующих материалах, например, синерезиса карбамидной смолы [167].

Методика изучения указанных процессов в большинстве случаев сводится к определению изменения во времени прочностных свойств приготовленных в лабораторных условиях закрепленных грунтов, хранящихся в различных средах [5, 126, 161–163]. В отдельных случаях такие исследования проводятся в закрепленных массивах [126, 149].

Влияние минерального состава на свойства закрепленных грунтов рассмотрено в работах В. В. Аскалонова, С. Д. Воронкевича, Л. А. Евдокимовой, С. С. Морозова, Е. Н. Огородниковой, В. Е. Соколовича и др. [8, 23, 27, 32, 107, 113, 149]. При силикатизации песчаных грунтов наилучший эффект достигается при наличии на частицах гидратированных железистых пленок. Прочность на сжатие закрепленных образцов с такими пленками увеличилась с 3,2 МПа (1 сутки) до 5,9 МПа (28 суток). В то время как у образцов с удаленными пленками она составляет соответственно 0,4 и 0,55 МПа [32]. С. С. Морозов и Н. Г. Дьячкова [107] при изучении влияния различных минералов на прочность песчаных грунтов, закрепленных карбамидной смолой, отмечают полный распад образцов, закрепленных в водонасыщенном состоянии при содержании кальцита более 1 %.

Е. Н. Огородниковой [113] показано, что произведенная перед закреплением карбамидной смолой обработка порошков различного минерального состава (в том числе и кальцита) раствором гидроокиси железа приводит к увеличению прочности закрепленных образцов во времени.

Исследованию того, как влияет состав подземных вод на свойства закрепленных грунтов, посвящен ряд работ. Эти работы в большинстве случаев основаны на изучении в лабораторных условиях влияния состава контактирующего раствора на прочностные свойства грунта. Установлено, что прочность лёссовых и песчаных грунтов, закрепленных силикатными растворами, увеличивается при контакте с растворами солей двух- и трехвалентных металлов [5, 149, 162, 163]. Е. С. Чаликовой [161] показано, что

песчаные грунты, закрепленные карбамидной смолой, устойчивы в растворах солей и при значениях pH среды в интервале 3–13. Р. С. Зиангиров и Л. В. Гончарова [42] отмечают, что фильтрация воды через закрепленные карбамидной смолой пески в отдельных случаях приводит к уменьшению их коэффициентов фильтрации из-за частичного набухания геля. В практике цементации грунтов хорошо изучены процессы разупрочнения и разрушения цементного камня при взаимодействии с подземными водами [41]. Ряд работ посвящен изучению диффузионного выноса в контактирующий раствор из закрепленных образцов компонентов жидкой фазы гелей. В. Е. Соколович [147] отмечает, что при контакте глинисто-силикатных гелей с дистиллированной водой в нее переходит до 90 % щелочи и до 50 % кремнезема. При этом образцы не разрушаются. При силикатизации лёссовых пород добавление к раствору силиката натрия раствора аммиака приводит к интенсификации реакции гелеобразования, что уменьшает вымывание из закрепленного грунта кремневой кислоты [150]. В работе Б. А. Ржаницына, В. И. Сергеева, Е. В. Степановой [127] показано, что вынос значительного количества щелочи и кремнезема из песчаных грунтов, закрепленных алюмосиликатным раствором, не приводит к увеличению их коэффициента фильтрации. В. И. Сергеев и И. П. Тейшова [137] изучали вынос в дистиллированную воду компонентов щавелевоалюмосиликатного геля из закрепленных песчаных образцов. Установлено, что в фильтрационный поток переходит 30 % щелочи, 40 % кремнезема и около 50 % оксалат-иона; при этом прочность образцов не снижается.

Об интенсивности протекания химических и физико-химических процессов свидетельствует изменение состава поровых растворов лёссовидных суглинков после закрепления их силикатным раствором, что отмечено в работе В. П. Ананьева, Л. П. Шуваловой, А. В. Морозова [6].

В отдельных случаях проводились натурные наблюдения за изменением состава подземных вод после создания цементационных завес. Например, наблюдалось увеличение щелочности вод в районе цемзавесы Камской ГЭС. По данным М. Б. Петровского и Н. С. Сергеевой [118], из цемзавесы основания Красноярской ГЭС в 1975 г. вынесено 6240 кг СаО.

Влияние процессов, происходящих после инъекции, может сказываться на свойствах пород за пределами закрепленного массива. Например, вынос щелочи из тела противофильтрационной завесы в основания Асуанской плотины привел к набуханию глинистой фракции грунта, что вызвало снижение его коэффициентов фильтрации в зоне, расположенной за завесой, и повлекло изменение гидродинамической обстановки [133].

Приведенные примеры подтверждают необходимость учета взаимодействия химических реагентов, внесенных в грунт, со средой, в которую производится инъекция. Такие процессы протекают продолжительное время

после окончания инъекции и могут оказать существенное влияние на конечный результат закрепления. Однако в практике закрепления грунтов оценка его результатов, как правило, производится в сравнительно короткие сроки после окончания инъекции, когда в массиве еще не восстановилось нарушенное равновесие и, как следствие, происходят изменение свойств закрепленных и прилегающих к ним пород. Только предвидя эти процессы, можно оценить конечные результаты закрепления [140].

В настоящее время при исследовании взаимодействия химических реагентов с природной средой в недостаточной степени учитывается геохимическая обстановка в закрепленном массиве. Исследователи, как правило, ограничиваются одним ее параметром (химический состав пород и подземных вод, pH) и намного реже привлекают большее их число для обоснования с геохимической точки зрения возможности применения того или иного раствора. При таком подходе, не охватывающем геохимическую обстановку в целом, не учитывающем взаимодействия ее компонентов и общей направленности процессов, трудно прогнозировать длительный эффект, полученный при закреплении. При оценке долговечности закрепленного массива необходимо рассматривать природные аналоги поведения интересующих нас веществ в данной геохимической обстановке, т.е. использовать положение, выдвинутое С. Д. Воронкевичем [23] об эвристической ценности геохимии гипергенных процессов для решения проблем инъекционного закрепления грунтов. Наряду с изменением геохимических параметров необходимо учитывать изменение параметров, определяющих массоперенос в массиве, особенно при тампонировании пород. Таких данных в литературе нами не встречено.

При изучении взаимодействия инъекционных материалов с породами и подземными водами многие исследователи не уделяют должного внимания механизму химических и физико-химических процессов, приводящих к закреплению грунта. В таком случае трудно или невозможно целенаправленно использовать геохимические особенности того или иного грунта для повышения эффективности закрепления, прогнозировать его поведение после закрепления.

Таким образом, на данном этапе развития способа инъекционного закрепления грунтов процессы взаимодействия химических реагентов с твердой и жидкой фазой пород в большинстве случаев рассматриваются в отрыве от природной и возникающей после закрепления геохимической обстановки. Накопленный к настоящему времени в этой области фактический материал свидетельствует о необходимости комплексного изучения геохимических процессов, протекающих при закреплении пород. Подход С. Д. Воронкевича [24] к закрепленным массивам как существенно обособленным целостным техногенно-геохимическим системам с присущими им за-

кономерностями может служить методологической основой для комплексной оценки влияния на свойства пород процессов, протекающих в этих системах.

Взаимодействия в системе инъекционные материалы — грунт начинают с момента начала инъекционного процесса, который, по определению С. Д. Воронкевича [32], представляет собой принудительное распространение инъекционных растворов в пустотном пространстве пород и связанный с этим процесс пропитывания массива на возможно большее расстояние от точки инъекции. Во времени инъекционный процесс ограничен длительностью действия избыточного давления и временем гелеобразования. При движении раствора во время инъекции его свойства меняются. Это вызвано разбавлением раствора, взаимодействием его с породами и подземными водами, процессами в самом растворе, предшествующими его твердению. Вследствие этих процессов меняются плотность, вязкость раствора, агрегатное состояние, химическая активность, время гелеобразования. Раствор в процессе инъекции следует рассматривать как многофазовый, многокомпонентный, высококонцентрированный флюид с переменным химическим составом и изменяющимися физическими свойствами. Таким образом, основным результатом химических и физико-химических процессов взаимодействия грунта и раствора, сопровождающих инъекцию, является изменение технологических характеристик раствора.

Внедрение в массив химических реагентов и образование искусственного цемента вызывает нарушение равновесия в закрепляемом массиве. Это обуславливает протекание химических и физико-химических процессов после окончания инъекции.

Процессы, происходящие при взаимодействии инъецируемых растворов, их компонентов и продуктов искусственной цементации с твердой, жидкой и газообразной составляющими грунта после окончания инъекции и изменяющие его физико-механические и фильтрационные свойства, предлагается называть **постинъекционными**. Результатом постинъекционных процессов, в отличие от процессов, сопровождающих инъекцию, является изменение свойств закрепленных и окружающих их грунтов.

При изучении взаимодействия техногенных материалов с грунтом можно выделить две стадии: 1 — инъекционную и 2 — постинъекционную. На первой стадии в массив поступает инъекционный раствор, что нарушает существующее равновесие в массиве. Эта стадия заканчивается после прекращения действия основных технологических параметров — избыточного давления и гелеобразования. Продолжительность ее не более нескольких часов. Следующая за ней вторая стадия продолжается до тех пор, пока в массиве не устанавливается новое равновесие. Длительность этого процесса измеряется годами. Процессы, происходящие на первой стадии, в достаточной степени технологически контролируемы (давление, время гелеоб-

разования, концентрация раствора). На второй стадии процессы стихийны. На первой стадии происходит интенсивное смешивание в массиве жидкой фазы под действием избыточного давления, для второй стадии характерен затрудненный водообмен, т.е. массив в процессе инъекции можно рассматривать как динамическую систему, а в постинъекционный период – как термодинамическую.

Таким образом, постинъекционная стадия является важной с точки зрения оценки конечных результатов закрепления. Однако для изучения постинъекционных процессов необходимо рассматривать процессы, во многом обуславливающие их, сопровождающие инъекцию. Эти процессы едины по своей химической и физико-химической сути, непрерывно следуют одни за другими.

Постинъекционные процессы представляют собой комплекс разнообразных гетерогенных химических и физико-химических реакций и процессов, протекающих в закреплённом массиве. Гетерогенная реакция включает в себя несколько этапов: подвод вещества в сферу реакции, химическое взаимодействие и отвод продуктов реакции. Таким образом, постинъекционные процессы следует рассматривать как совокупность процессов, имеющих как химическую, так и физическую природу.

Важными характеристиками постинъекционных процессов являются их направленность и продолжительность. Под направленностью понимается снижение или усиление с течением времени положительного эффекта, полученного при закреплении грунта. Продолжительность постинъекционных процессов следует ставить в соответствие с проектным сроком службы закреплённого массива. В случае отрицательной направленности постинъекционных процессов время снижения положительного эффекта должно быть намного больше срока службы закреплённого массива. При наличии быстро протекающих постинъекционных процессов, усиливающих положительный эффект, можно проводить закрепление грунтов, существенно снизив количество инъекционных материалов. При изучении постинъекционных процессов необходимо оценить их интенсивность, результат воздействия и область массива, в которой они будут протекать. Знание закономерностей постинъекционных процессов позволит оценить:

- конечный результат закрепления;
- долговечность закреплённого массива;
- целесообразность применения того или иного раствора в конкретной инженерно-геологической обстановке;
- возможность целенаправленного использования постинъекционных процессов для повышения эффективности применения раствора;
- воздействие инъекционного закрепления на окружающую среду.

2.2. Факторы, определяющие интенсивность постинъекционных процессов

Протекание постинъекционных процессов обусловлено нарушением равновесия в закрепленном массиве, которое вызвано внедрением в него значительных количеств веществ, не свойственных природной обстановке, и изменением миграционных параметров среды. Интенсивность постинъекционных процессов определяется химической и физико-химической активностью вносимых в грунт веществ и компонентов массива – пород, подземных вод и газов, условиями массопереноса, давлением, температурой.

Основной объем инъекционных работ, в особенности с применением химических растворов, приходится на осадочные породы зоны гипергенеза, реже закреплению подвергаются магматические и метаморфические породы, которые в естественном состоянии, как правило, обладают приемлемыми инженерно-геологическими свойствами. Для зоны гипергенеза уже на небольшой глубине характерны незначительные колебания температуры и давления [79], поэтому роль этих факторов не рассматривается. Объектом закрепления являются в основном химически активные породы, свойства которых наиболее чувствительны к изменению параметров среды. Закрепление таких пород направлено на придание им устойчивости к изменению равновесия под влиянием инженерной деятельности человека. Для химически активных пород, которые в той или иной степени растворимы, характерны подземные воды со значительной минерализацией, которые будут принимать участие в постинъекционных процессах. Наличие в закрепленном массиве таких газов, как сероводород, метан и др., может также стать причиной различных геохимических процессов. На закрепленный массив, вероятно, оказывают воздействие микробиологические процессы, которые стимулируются введением в грунт инъекционных материалов, содержащих органические вещества [14].

Способность инъекционных растворов улучшать свойства грунтов основана на химических и физико-химических реакциях, протекающих в сравнительно короткое время, что достигается применением реагентов, обладающих значительной активностью. Таким образом, закрепленный массив состоит из в той или иной степени активных компонентов.

На скорость постинъекционных процессов влияет интенсивность миграции вещества в массиве, которая во многом зависит от преобладания механизма массопереноса: конвективного или диффузионного [65]. От скорости миграции зависит интенсивность поступления вещества в сферу и из сферы реакции. Она может являться лимитирующей стадией постинъекционных процессов, т.е. определять их общую интенсивность. Рассмотрим подробнее перечисленные факторы.

Химическая и физико-химическая активность пород определяется активностью составляющих их минералов. При закреплении пород основное значение будет иметь химическая активность минералов по отношению к инъекционному раствору и подземным водам, измененным в результате закрепления. Процессы, возникающие на месте контакта породы с продуктами твердения, будут играть существенно меньшую роль, так как реакции между твердыми веществами происходят чрезвычайно медленно.

Интенсивность процессов на границе раздела жидкость – минерал зависит от таких характеристик твердой фазы, как растворимость, скорость растворения. Об активности минерала дает представление его растворимость, связанная с величиной энергии кристаллической решетки [141]. В случае протекания реакции в жидкой фазе растворимость характеризует максимальное количество вещества, способного перейти в раствор, т.е. вступить в реакцию. Интенсивность этого процесса определяется скоростью растворения минерала. Поэтому при прочих равных условиях минералы с большей скоростью растворения будут обладать большей химической активностью. Скорость растворения минералов оказывает большое влияние на общую скорость многих природных гетерогенных химических реакций, так как является лимитирующей стадией во многих процессах [40]. При оценке химической активности минерала необходимо учитывать, к какому типу относится процесс его растворения: диффузионному, кинетическому или промежуточному [65]. Минералы, растворяющиеся по кинетическому типу, имеют малые абсолютные значения скорости растворения (кварц, ангидрит) в отличие от минералов, растворяющихся по диффузионному типу (галит, гипс, кальцит). Например, растворимость кварца и кальцита в дистиллированной воде примерно одинакова (около 10 г/л), однако скорость растворения кварца настолько мала, что его можно считать практически нерастворимым и химически достаточно инертным.

Для осадочных пород без жестких кристаллических связей при наличии в них глинистых минералов показателями активности, которые учитываются при инъекционном закреплении, могут служить емкость поглощения и сорбционная емкость [31], показывающая максимальное количество компонентов раствора, поглощенное грунтом при движении через его поровое пространство. Сорбционная емкость является суммарной характеристикой всех процессов (адсорбции, абсорбции, химического воздействия, кинетической коагуляции и др.), которые переводят компоненты раствора в твердую фазу.

Химическая активность подземных вод. Для характеристики активности подземных вод используются такие показатели, как концентрация отдельных компонентов, общая минерализация, ионная сила раствора, активная концентрация ионов, водородный показатель, окислительно-восстановительный потенциал. Химическая и физико-химическая активность мате-

риалов, вносимых в грунт, складывается из активности инъекционного раствора, продуктов твердения и неотвержденных компонентов раствора. Неотвержденные компоненты инъекционного раствора, смешанные с подземными водами, получили название постинъекционных растворов. Такие растворы отличаются от инъекционных более низкой концентрацией, наличием в составе компонентов подземных вод и продуктов реакции инъекционного раствора с породами и подземными водами. Активность инъекционных и постинъекционных растворов характеризуется теми же показателями, что и активность подземных вод. Эти показатели по своим значениям могут существенно отличаться от природных. Например, концентрация инъекционных растворов превышает в сотни и тысячи раз концентрации природных растворов, ведущих к литификации пород, что является одной из причин несравнимо меньшей скорости природных процессов. Водородный показатель инъекционных растворов колеблется в широких пределах от 4 (синтетические смолы) до 12 (растворы на основе силиката натрия), в то время как значения рН подземных вод обычно составляют 6,0-8,5.

Многие инъекционные растворы обладают способностью к образованию комплексных соединений, так как содержат в своем составе как элементы-комплексобразователи (алюминий, железо, хром), так и леганды (оксалат-ион). Образование комплексных соединений с компонентами подземных вод нарушает равновесие в системе минерал — подземные воды и способствует разложению минерала вследствие отвода продуктов реакции от поверхности растворения. Растворимость твердой фазы увеличивается с увеличением концентрации легандов и элементов-комплексобразователей, а также возрастает прямо пропорционально увеличению констант устойчивости комплексных соединений, образуемых компонентами твердой фазы в растворе [82].

Важную роль при оценке химической активности жидкой фазы будет играть миграционная способность техногенных элементов и соединений. Химическая и физико-химическая активность продуктов твердения инъекционных растворов наряду с реакционной способностью обусловлена их строением, возникающим в процессе структурообразования. Различают четыре основных механизма структурообразования: взаимопрорастание кристаллов, поликонденсация, полимеризация и коагуляция [32]. Образующиеся при этом вещества состоят из двух элементов: твердой пространственной структуры и жидкости, заполняющей пустотное пространство. Состав жидкости формируется за счет компонентов раствора, не вовлеченных в реакцию, продуктов обменных реакций и веществ, выделяющихся при поликонденсации. Активность продуктов твердения определяется активностью твердой и жидкой фазы. При оценке активности жидкой фазы следует учитывать фильтрационные и диффузионные параметры продук-

тов твердения, которые будут определять интенсивность поступления вещества в сферу реакции.

Для исследования постинъекционных процессов в закреплённом массиве выделялись бинарные системы, в которых существуют наиболее контрастные геохимические условия. Такой подход к изучению сложных и многообразных процессов, на наш взгляд, является методологически целесообразным. Рассмотрим особенности таких систем на примере тапонажного закрепления пород гелеобразующими растворами.

Система инъекционный раствор — подземные воды. При инъекции в массиве возникает зона, где концентрация раствора меняется от исходной до нулевой. Компоненты подземных вод в этой зоне могут как способствовать, так и препятствовать гелеобразованию раствора. В результате гидродинамической дисперсии раствора и химических процессов в зоне разбавления меняется состав подземных вод, что приводит к формированию постинъекционных растворов. Такие растворы могут обладать агрессивностью по отношению к породам.

Система гель — подземные воды. Эту систему можно рассматривать как трехкомпонентную: скелет геля — интермицеллярная жидкость геля — подземные воды. В ней существуют условия для встречной диффузии компонентов подземных вод и интермицеллярной жидкости. В том случае, если эти компоненты взаимодействуют между собой, реакция может протекать в подземных водах, в интермицеллярном пространстве геля, на поверхности скелета геля. При этом меняются состав и свойства геля и состав подземных вод.

Система породы — постинъекционные растворы. При контакте породы с раствором происходят различные процессы: адсорбция, ионный обмен, химические реакции. Для пород с жесткими кристаллическими связями первые два процесса незначительны. Химические реакции породы с растворами могут идти как с образованием, так и без образования новой фазы. К реакциям без образования твердой фазы относятся взаимодействие между многими окислами и гидроокислами с кислотами [4]. Такие реакции являются нежелательными в массиве. Реакции, происходящие с образованием новой твердой фазы, могут идти как с увеличением, так и с уменьшением суммарного объема твердой фазы и, следовательно, повлиять на фильтрационные свойства пород. В этой системе изменения будет претерпевать не только порода, но и раствор. Взаимодействие с породой может в отдельных случаях вызвать отверждение непрореагировавших компонентов раствора.

Система гель — порода. В этой системе наиболее активные процессы могут протекать при взаимодействии жидкой фазы геля с породой. Твердая фаза гелей обычно достаточно инертна.

После выделения бинарных систем на основе лабораторных и натуральных исследований, оценивалось воздействие процессов, протекающих в них, на свойства закрепленного массива. В закрепленном массиве изучались изменения условий массопереноса и геохимических параметров во времени, а также изменения наиболее важных с инженерно-геологической точки зрения свойств пород под воздействием постинъекционных процессов. При тампонирования пород таким свойством может быть коэффициент фильтрации пород. Конечным результатом изучения постинъекционных процессов является типизация геохимических условий с точки зрения выбора оптимального инъекционного раствора. В данной работе рассматривается воздействие силикатных растворов на такую активную геохимическую систему, какой являются гипсоносные породы.

Постинъекционные процессы в значительной степени определяют эффективность закрепления массивов пород и стабильность достигнутого положительного эффекта. Эти показатели имеют особую важность для противофильтрационных завес, созданных с целью защиты от растворения растворимых пород в основании плотин. В этом случае снижение эффективности завесы во времени может отрицательно сказаться на безопасности эксплуатации сооружения.

Противофильтрационные завесы, рассматриваемые как закрепленные участки в основании плотин, имеют следующие особенности:

- длина завесы во много раз превышает ширину, т.е. в плане она может рассматриваться как линейный элемент, обладающий низкой водопроницаемостью;
- завеса существует в области высоких гидравлических градиентов, вызванных ее созданием;
- геохимические условия техногенной среды района завесы существенно отличаются от окружающей ее природной среды;
- после создания завесы происходит изменение интенсивности массопереноса вещества в массиве.

Для обеспечения надежной работы завеса должна отвечать следующим требованиям:

- обладать высокой плотностью и быть достаточно однородной на всем протяжении;
- обладать устойчивостью к гидродинамическому воздействию потока;
- обладать химической устойчивостью и долговечностью.

Указанные особенности обстановки в районе завесы обуславливают разнообразные интенсивные постинъекционные процессы. Требования, предъявляемые к завесам, определяют большую значимость этих процессов при оценке надежности работы завесы. Таким образом, представляется целесообразным с практической и методической точки зрения изу-

чать постинъекционные процессы, возникающие после создания противофильтрационных завес.

При наличии растворимых пород в основании плотин постинъекционные процессы могут повлиять на их сохранность, поскольку, во-первых, эти породы подвергаются воздействию постинъекционных растворов; во-вторых, названные процессы определяют долговечность завесы и, следовательно, эффективность защиты пород от растворения.

Убедительным примером объекта, когда оценка влияния постинъекционных процессов на сохранность растворимых пород является практической необходимостью, является Камская ГЭС, основание которой слагают трещиноватые карбонатные гипсоносные породы. Здесь в условиях действующего сооружения производилось инъекционное доуплотнение малоэффективной цементационной завесы щавелевоалюмосиликатным раствором. Применение щелочного силикатного раствора в трещиноватых гипсоносных породах не имеет аналогов в практике гидротехнического строительства. В связи с этим встал вопрос о сохранности гипса и вообще о целесообразности такого мероприятия [149].

В связи с изложенным цель наших исследований заключалась в изучении направленности, характера и интенсивности постинъекционных процессов, возникших при изменении геохимической обстановки в результате использования силикатных растворов, их влияния на химическую устойчивость гипса и тампонажного геля в связи с оценкой качества и долговечности завесы и соответственно безопасности плотины. Для достижения названной цели в работе решались следующие задачи:

1. Исследовать химические и физико-химические закономерности образования постинъекционных растворов при уплотнении силикатными растворами гипсоносных скальных массивов с минерализованными подземными водами. Эта задача включает:

- изучение процессов, происходящих при смешивании силикатного раствора с подземными водами;
- выявление роли диффузии компонентов жидкой фазы геля в формировании постинъекционных растворов;
- анализ изменений химического состава подземных вод в районе противофильтрационной завесы.

2. Исследовать химическую устойчивость гелей в теле завесы при их взаимодействии с минерализованными подземными водами.

3. Исследовать механизм взаимодействия кремнеземсодержащих постинъекционных растворов с гипсом с целью оценки его химической устойчивости.

4. Дать количественную оценку влияния формирования и развития во времени специфической техногенно-геохимической обстановки на фильтрационные параметры пород и завесы.

Изучение постинъекционных процессов целесообразно начинать с выделения в массиве бинарных систем, в которых интенсивно протекают процессы, влияющие на свойства пород.

Основными признаками, с помощью которых характеризуются выделенные системы, стали вещественный состав их компонентов и режим массопереноса в массиве. Наиболее химически активным компонентом пород основания плотины является гипс. Этот минерал обладает наибольшей растворимостью и наибольшей скоростью растворения по сравнению с другими породами: доломитами, мергелями, известняками. По результатам исследований, проведенных С. Д. Воронкевичем, Л. А. Евдокимовой, Е. Н. Огородниковой, Н. А. Ларионовой [28, 35], а также по данным других авторов [7, 39], карбонатные породы достаточно инертны по отношению к щелочным кремнеземсодержащим растворам. Активность химического взаимодействия оксалата натрия с карбонатами существенно ниже, чем с гипсом [35].

В ходе инъекционного процесса благодаря гидродинамической дисперсии в периферийной части закачиваемого раствора происходит постоянное смешивание вводимого в трещинное пространство раствора с подземными водами [20, 23, 29, 72], т.е. возникает динамическая система инъекционный раствор — подземные воды. Основными факторами, от которых зависит величина зоны разбавления, являются ширина раскрытия трещин и их геометрия, скорость движения подземных вод и параметры, характеризующие инъекционный процесс — давление, продолжительность инъекции, вязкость и плотность раствора.

После создания завесы изменяются гидродинамический режим в массиве и характер массопереноса. Для оценки преобладающего типа переноса вещества — конвективного или диффузионного — можно использовать критерий Пекле (Pe), представляющий безразмерную величину VL/D , где V — действительная скорость фильтрации; D — коэффициент молекулярной диффузии; L — характерный линейный размер, в пределах которого происходит изменение концентрации рассматриваемого соединения [65]. Рассеяние вещества в направлении фильтрации при $Pe > 10$ определяется только конвекцией; при $Pe < 5 \cdot 10^{-2}$ — только молекулярной диффузией, при $5 \cdot 10^{-2} < Pe < 10$ — смешанный массоперенос.

Используя критерий Пекле, оценим преобладающий тип массопереноса через различные среды, образующие противофильтрационную завесу Камской ГЭС (табл. 2.2).

Для расчета использовались параметры, приведенные в работах С. Н. Емельянова [56], других исследователей [80, 90], автора. Величина параметра L для остаточных трещин может быть принята равной мощности зоны, где после инъекции возникли градиенты концентраций, т.е. сумме мощ-

Таблица 2.2 Типы массопереноса вещества в теле противофильтрационной завесы основания Камской ГЭС

Среда	Скорости движения подземных вод, см/с	Коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$	L, см	Re	Тип массопереноса
Незатампонированные трещины	$6 \cdot 10^{-4}$	10^{-5}	20^3	$6 \cdot 10^2$	конвективный
Гель	10^{-7}	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-4}	$2 \cdot 10^{-6}$	диффузионный
Породы с жесткими кристаллическими решетками	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-7} - 10^{-8}$	10^{-5}	$10^{-8} - 10^{-7}$	диффузионный

ностей завесы и зоны разбавления (около 10 м). Для порового пространства геля и пород L принимается равным расстоянию между их частицами [65].

Проведенный расчет показывает (табл. 2.2), что в закрепленном массиве существуют два типа массопереноса. В незатампонированных трещинах в теле завесы преобладающим является конвективный перенос растворенных веществ. Из этого следует, что постинъекционные растворы будут достаточно быстро мигрировать по направлению потока и могут вступать во взаимодействие с породами за пределами завесы.

В поровом пространстве гелей и пород преобладает диффузионный перенос. По сравнению с переносом вещества через остаточные незатампонированные трещины, имеющем конвективный характер, массоперенос реакционноспособных веществ через поровое пространство пород с жесткими кристаллическими связями будет незначительный [90] и в данной работе рассматриваться не будет.

Диффузия в неподвижной среде по направлению к нормали поверхности, через которую происходит перенос вещества (одномерная диффузия), при постоянной температуре подчиняется известному закону Фика. В том случае, если диффундирующее вещество вступает в химическую реакцию, закон переноса вещества имеет сложные зависимости, рассмотренные в ряде работ [40, 129].

Задача о фильтрации смеси веществ, которую представляют собой постинъекционные растворы, с учетом химического взаимодействия со средой, очень сложна и в общем виде в настоящее время не решена [40]. Поэтому в данной работе закономерности постинъекционных процессов рассматриваются на качественном уровне.

Принимая во внимание сказанное, в массиве после создания завесы выделены следующие системы.

Гель — подземные воды. Такая система возникает в частично затампонированных трещинах (a_1) и в периферийных частях завесы (a_2) (рис. 2.1). Под-

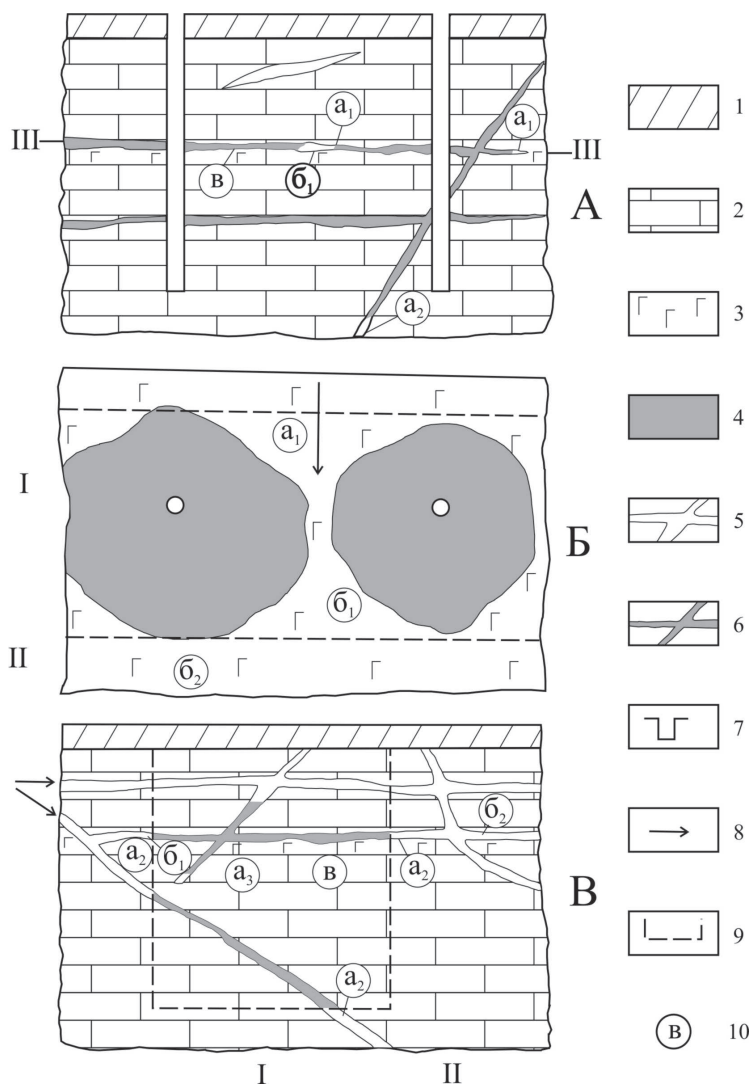


Рис. 2.1. Схематизация постинъекционных условий в районе завесы. Разрезы: А – вдоль оси завесы, В – поперек оси завесы; Б – план (по линии III – III). 1 – бетон, 2 – карбонатные породы, 3 – гипс, 4 – гель; трещины: 5 – незаполненные гелем, 6 – заполненные гелем; 7 – инъекционные скважины, 8 – направление движения подземных вод, 9 – контур завесы, 10 – выделенные бинарные системы (пояснения в тексте); I – тело завесы, II – зона распространения постинъекционных растворов

земные воды в этой системе могут интенсивно перемещаться относительно поверхности геля (a_1), возможны также случаи, когда такое движение будет незначительно (a_3 и a_2). Диффузионный перенос растворенного вещества в поровом пространстве гелей обусловлен различием состава и концентрацией интермицеллярной жидкости геля и подземных вод. Активное протекание встречной диффузии компонентов интермицеллярной жидкости геля и подземных вод вызвано следующими причинами: 1) высоким значением коэффициента диффузии в гелях, сопоставимым с таковым в сплошной водной среде (табл. 2.2); 2) высокими градиентами концентраций (энергетической основы диффузии), которые поддерживаются благодаря отводу веществ движущимися подземными водами, а также химическим реакциям как в геле, так и в подземных водах, переводящим диффундирующие компоненты в твердую фазу.

Постинъекционные растворы — гипс. Постинъекционные растворы могут воздействовать на гипс как в теле завесы (b_1), так и за ее пределами (b_2) (рис. 2.1). Перенос жидкой фазы в этой системе определяется остаточными скоростями фильтрации, однако в теле завесы и ее периферийных частях могут существовать застойные зоны.

В системе *гель—гипс* (рис. 2.1 в) перенос вещества осуществляется за счет диффузии в интермицеллярной жидкости геля. Процессы взаимодействия в ней наименее активны по сравнению с другими системами.

Выделенные системы послужили основой для проведения исследований и интерпретации их результатов.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИЛИКАТНЫХ РАСТВОРОВ И ГЕЛЕЙ С МИНЕРАЛИЗОВАННЫМИ ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ

3.1. Основные свойства природных и искусственных силикатных водных растворов

Характер постинъекционных процессов во многом определяется составом используемых инъекционных растворов. Применяемые для закрепления грунтов силикатные растворы содержат кремнезем в различных формах — от ионов до коллоидных частиц, — что обусловлено специфическими свойствами кремнекислоты, в первую очередь ее склонностью к полимеризации. Различные формы кремнезема обладают разной химической активностью. На свойства растворов при наличии в них коллоидной составляющей влияет временной фактор. О сложности силикатных водных систем свидетельствует и тот факт, что, несмотря на многочисленные исследования этих систем в различных областях химии, геологии, физики, биоло-

гии, есть неразрешенные принципиальные вопросы, как, например, причины недонасыщенности морских вод кремнеземом [152].

При изучении постинъекционных процессов в массивах, закрепленных силикатными растворами, необходимо учитывать следующие особенности силикатных водных систем: 1) условия существования различных форм кремнекислоты и их химическую активность; 2) условия осаждения кремнезема; 3) химическую устойчивость осажденного кремнезема.

В закрепленном массиве присутствуют как высококонцентрированные силикатные растворы (на стадии инъекции), так и растворы с концентрацией кремнезема, близкой к природной. Поэтому при рассмотрении указанных вопросов необходимо учитывать закономерности миграции и осаждения кремнезема в природных условиях, а также процессы в искусственных силикатных растворах.

Жидкое стекло (силикат натрия), применяемое для закрепления грунтов, - это водный раствор, состоящий из соединений, близких к метасиликату, ортосиликату, дисиликату, трисиликату натрия, представляющих собой полимерные ионы. Водородный показатель жидкого стекла 13-14. В водной среде при нейтрализации щелочи до значений pH 10,7 происходит гидролиз и деполимеризация силикатов натрия до кремневой кислоты. В определенных условиях кремневая кислота может образовывать объемные полимеры (гели) [41, 58].

Кремневая кислота в водных растворах находится в различных формах: в виде коллоидных частиц, образованных агрегатами молекул, макромолекул, а также в ионных формах различной сложности. Между указанными формами существует состояние равновесия, которое меняется в зависимости от химических и физических условий. Структуры и степень полимеризации кремнезема в настоящее время однозначно не установлены. Основными факторами, влияющими на соотношение форм кремнезема в растворе, являются: pH среды, концентрация кремнезема, наличие в растворе других электролитов, время существования раствора. Температура вплоть до 250° существенного влияния не оказывает [130].

При растворении кремнезема, независимо от его модификации, при значениях водородного показателя ниже 8 в раствор переходит кремнезем в форме молекул мономерной кремневой кислоты, образующих истинные растворы. Кремневая кислота незначительно диссоциирует в растворе и по своей силе слабее, чем угольная. При увеличении значений pH раствора происходит диссоциация кремневой кислоты и образование устойчивых ионных форм. В интервале значений pH от 8 до 14 преобладающей является определенная форма кремнезема, а растворы представляют смеси этих различных форм [105].

При старении или снижении pH силикатных растворов происходит их постепенный переход от молекулярно-дисперсного состояния к коллоидному. Установлено, что при этом процессе образуются относительно устойчивые частицы с определенным молекулярным весом (например, 8260, 32870), которые могут существовать продолжительное время [174]. При полимеризации кремневой кислоты в растворе всегда остается некоторое ее количество в молекулярной форме, равное растворимости аморфного кремнезема [105]. Растворимость кремнезема зависит от того, в какой форме находится твердая фаза. При обычных условиях растворимость аморфного кремнезема составляет, по данным разных авторов, от 0 до 120 мг/л. Растворимость кристаллических модификаций кремнезема оценивается величинами 6-22 мг/л [49, 83]. С увеличением температуры и pH среды начиная с 8 растворимость всех форм кремнезема возрастает.

По данным большинства исследователей, преобладающей формой кремнезема в природных водах является молекулярно-диспергированный кремнезем в форме кремневой кислоты H_2SiO_4 . Кремнезем попадает в воды в результате континентального выветривания, вулканической деятельности или непосредственного растворения силикатов. В современных речных водах содержание кремнезема достигает 10-20 мг/л, в морских — 0,02-3 мг/л [152]. Те и другие воды являются недонасыщенными по кремнезему. Содержание кремнезема в подземных водах связано с геотектоническими условиями. Г. В. Богомоллов и др. [15] выделяют платформенные области, для которых характерны воды с невысоким содержанием кремнезема — до 20-40 мг/л (в зоне активного водообмена в большинстве случаев до 20 мг/л) и геосинклинальные области, отличающиеся выходами термальных и углекислых источников со значительным количеством кремнезема: 100-500 мг/л. Основными факторами, определяющими содержание кремнезема в подземных водах, являются минерализация, температура и pH. М. Г. Валяшко [21] отмечает, что кремневая кислота играет значительную роль в формировании сухого остатка вод с минерализацией менее 1 г/л. Роль кремнезема снижается при наличии в воде солей кальция и магния, поскольку с этими катионами он образует труднорастворимые соединения. Влияние температуры и pH на концентрацию кремнезема в подземных водах обусловлено тем, что с повышением этих параметров повышается растворимость кремнезема. Например, в Калифорнии в водах источника из вулканических пород с pH 11,6 содержание кремнезема достигает 5,2 г/л [15].

Инъекция в массив силикатных растворов вызывает различные физико-химические процессы, которые по своей природе сопоставимы с природными процессами хемогенной миграции и осаждения кремнезема. Осаждение кремнезема — распространенный геохимический процесс, который играет существенную роль в литогенезе. Он может вызываться раз-

личными причинами: изменением рН среды, охлаждением, испарением, химическими реакциями, коагуляцией, сорбцией, а также жизнедеятельностью некоторых организмов. Для нашего исследования наиболее важны закономерности осаждения кремнезема при изменении рН среды под действием растворов электролитов и при взаимодействии с породами.

Уменьшение водородного показателя среды приводит к снижению растворимости кремнезема, создает условия для полимеризации и, следовательно, его осаждения. В зоне гипергенеза широко известны процессы осаждения кремнезема из щелочных содовых вод при подкислении среды углекислым газом. Осаждение под действием электролитов проявляется при слиянии пресных речных и соленых морских вод. Осадителями кремнезема в этом случае являются ионы алюминия, железа, марганца, кальция и магния [70]. Хемогенное осаждение кремнезема происходит в глубоководных частях океана. Например, в красных глубоководных глинах Индийского океана обнаружено значительное содержание аморфных кремнеземо-железистых комплексов. Комплексы образуют частицы размером 1,5-2 мкм, которые составляют до 70 % абиогенной фракции красных глин [181].

Источником кремнезема на дне современных и древних морей нередко служат выходы термальных вод вулканического происхождения. Примером сингенетического осаждения кремнезема таких источников морскими водами могут служить кремнисто-карбонатные породы докембрия Сибирской платформы. Здесь среди карбонатных пород залегают кварцево-халцедоновые породы (до 10 %) в виде линз и прослоев, нередко имеющие следы колломорфных структур, в которых иногда сохранены следы течения геля [71].

Осадителями кремнезема являются некоторые природные органические вещества: кислоты, фенолы, целлюлоза и др. Наличие в подземных водах этих веществ ведет к снижению концентрации кремнезема [19, 49, 104].

Кремнезем может осаждаться при взаимодействии с различными минералами: карбонатами, гипсом и др. Примером такого процесса служит окремнение известняков и доломитов [55, 83]. Хемогенные новообразования гелей кремнекислоты, по мнению И. Г. Коробановой и Н. П. Затенацкой [81], играют важную роль в природном процессе цементации глинистых и других пород.

Коагуляция кремнезема под действием растворов электролитов в лабораторных условиях исследовалась рядом авторов [1, 71, 114, 134], при этом были получены в некоторых случаях противоречивые и трудновоспроизводимые результаты. Это связано, во-первых, с медленным течением процессов (десятки и даже сотни лет) в силикатных системах, особенно в области малых концентраций; во-вторых, с возможностью протекания самопроизвольных процессов и метастабильностью формирующихся со-

единений; в-третьих, с наличием в растворах разнообразных форм кремнезема, обладающих различной реакционной способностью. Так, существуют три формы продуктов поликонденсации ортокремневой кислоты, которые отличаются друг от друга по реакции с молибденовой кислотой и желатиной [164]. Выявление подобных форм, установление их количественного соотношения крайне затруднено.

При взаимодействии с электролитами в силикатных растворах происходят два типа реакций: физико-химические с коллоидной частью и химические с истинно растворенным кремнеземом, что может привести к осаждению кремнезема.

В коллоидных растворах происходит два ряда процессов, приводящих к его осаждению, — седиментация и коагуляция. Под седиментацией понимается выделение дисперсной фазы путем ее оседания под действием гравитационных сил, под коагуляцией — укрупнение частиц дисперсной фазы в результате слипания или слияния частиц. Последний процесс может происходить как под действием коагуляторов, так и самопроизвольно, поскольку сопровождается уменьшением величины поверхности частиц.

Коагуляторами силикатных зольей, частицы которых в щелочных условиях заряжены отрицательно, могут служить катионы растворов электролитов. Коагулирующее действие катионов возрастает с увеличением их валентности. При коагуляции смесью электролитов порог коагуляции не всегда оказывается промежуточным между порогами коагуляции этих электролитов. Часто коагулирующая способность одного электролита снижается при добавлении к нему другого. При смешивании разнозаряженных зольей может происходить их взаимная коагуляция. Примером может служить коагуляция зольей кремнезема под действием зольей алюминия. Рассмотрим влияние различных солей, формирующих подземные воды, на осаждение различных форм кремнезема.

Соли одновалентных металлов. По данным В. А. Ковды [77], сульфаты, хлориды и нитраты натрия не вызывают осаждения ионов кремнезема из разбавленных растворов и уменьшают связывание его с ионами кальция и магния. Аналогичные данные получены Ю. П. Казанским и др. [71] и для бикарбоната натрия. Есть указание на то, что в присутствии солей натрия растворимость кремнезема повышается [39]. Соли натрия уменьшают устойчивость коллоидного кремнезема и вызывают его коагуляцию, что подтверждено опытами по его осаждению хлористым натрием [174].

Соли двухвалентных металлов (кальция и магния). Катионы кальция и магния вызывают коагуляцию коллоидного кремнезема. В процессе коагуляции эти ионы не вступают в химическую реакцию с коллоидным кремнеземом, в результате чего образуется чистый аморфный осадок или гель кремнезема. Ионные формы кремнезема реагируют с катионами кальция

и магния с образованием аморфных гидросиликатов этих металлов. Начальная концентрация кремнезема, при которой происходит осаждение ионом кальция — 100 мг/л, ионом магния — 60–70 мг/л, поэтому в смесях солей этих катионов кремнезем связывается преимущественно с магнием [21]. Свойства солей кальция и магния осаждать кремнезем используется в технической мелиорации грунтов. Эти соли используются в качестве отвердителей растворов силиката натрия [9, 32, 126].

Соли трехвалентных металлов. Ионы алюминия, железа осаждают кремнезем как в коллоидной, так и в ионной формах. Окамото и др. [114] указывают, что для осаждения коллоидного кремнезема достаточно микроколичеств алюминия, а для того, чтобы осадить молекулярно-диспергированный кремнезем, необходимо значительно большее количество иона. Установлено, что 1 мг алюминия осаждаёт около 40 мг коллоидного кремнезема. Гидроокислы, соли железа и кремнезем оказывают взаимное осаждающее действие друг на друга. В зависимости от соотношения их концентраций может выпадать то один, то другой компонент [39, 144]. Мюллер указывает, что пять молекул кремнезема сорбируют одну молекулу железа [37]. Исследование феррисиликатных систем, проведенное Е. И. Соколовой и др. [144] с целью изучения условий образования железных руд, показали, что в этих системах формируются близкие к аморфным ферсикаты с четким стехиометрическим соотношением компонентов, что говорит о некоторой упорядоченности их структуры.

Анионы, входящие в состав подземных вод, как правило, не взаимодействуют с кремнеземом, однако при определенных условиях могут образовывать с кремнеземом соединения. Ю.С. Черкинский и И.С. Князькова [165] установили, что в разбавленных водных растворах ион хлора образует комплексное соединение с кремнекислородным катионом, обладающее некоторой устойчивостью. Существуют указания, что даже при тщательной очистке гидрозоля кремнезема от сульфат-ионов в золе присутствует 2–3 молекулы сульфата на 1000 молекул кремнезема [174].

3.2. Структура и свойства силикатных гелей

Гелеобразование является одним из видов коагуляции, при которой образуются не дискретные частицы, вся масса коллоида, связывая растворитель, переходит в своеобразное полужидкое-полутвердое состояние. Образование геля заключается не только в коагуляции, но и в поликонденсации кремневой кислоты [110]. При добавлении в раствор силиката натрия отвердителей, которыми могут служить кислоты двух- или многовалентных металлов, за счет коагуляции происходит укрупнение коллоидных частиц и конденсация ионных форм кремнекислоты в более сложные комплексы.

С образованием крупных частиц раствор становится гетерогенным, происходит сцепление частиц в гроздья и цепи в местах их наименьшей гидрофильности. В золе по мере увеличения агрегации частиц появляется структурная сетка и происходит застуднение всей массы [110]. Трактовка механизма гелеобразования на молекулярном уровне в настоящее время неоднозначна и подробно рассмотрена рядом авторов [30, 59, 142].

Сформировавшийся гель состоит из двух существенно обособленных элементов: скелета и интермицеллярной жидкости. Ажурный скелет геля составляют структурные элементы угловатой формы с большим количеством контактов. В свежеприготовленном геле на каждую молекулу кремнезема приходится около 300 молекул воды, из которых меньшая часть связана с молекулами кремнезема, а большая часть заключена между структурными элементами. Вода на поверхности частиц удерживается адсорбционными силами. Во внутренней структуре геля находится 4% воды, химически связанной с ядрами частиц геля. При уменьшении количества воды меняются механические свойства геля. При содержании 30-40 молекул воды на одну молекулу кремнекислоты гель легко режется ножом, при 20 — он плотный и тугой, при 10 — рассыпчатый, при 6 — после размалывания образует тонкозернистый порошок [174].

Интермицеллярная жидкость геля формируется из неотвержденного силиката натрия и компонентов отвердителя, не участвующих в реакции гелеобразования. При промывке геля можно в принципе заполнить все его интермицеллярное пространство дистиллированной водой или другим раствором, не взаимодействующим с гелем, при этом прочностные свойства геля существенно не меняются [30]. После образования геля в нем самопроизвольно протекают различные процессы, которые получили общее название — старение геля. Эти процессы приводят к перестройке структуры геля с общей тенденцией укрупнения структурных единиц. К таким процессам относятся вторичное гелеобразование интермицеллярной жидкости, синерезис, переконденсация, т.е. растворение более мелких частиц и осаждение кремнезема на более крупных структурных элементах [3, 59].

При отверждении силиката натрия солями кальция, магния, алюминия и др. образуются кальцийсиликатные, магнийсиликатные, алюмосиликатные гели, в которых наряду с однородными силаксановыми связями формируются смешанные кальцийсилаксановые, магнийсилаксановые, алюмосилаксановые связи. Силикатные, магний- и кальцийсиликатные гели рентгеноаморфны [47, 142]. Состав и концентрация отвердителя влияют на структуру гелей [16]. Формирование алюмосиликатных гелей из смеси силиката натрия с растворами солей алюминия происходит в довольно широкой области соотношения составов смесей. Гелеобразование не происходит при больших соотношениях кремния и алюминия и из сильноще-

лочных растворов с небольшим содержанием кремнезема и глинозема [58]. При соотношения кремния и алюминия выше 4,8 гели рентгеноаморфны, а при более низком обнаруживают высокую степень кристалличности [61].

При взаимодействии гелей с растворами электролитов, содержащих кальций и магний, происходит хемосорбция этих катионов и синтез на поверхности скелета геля аморфных, труднорастворимых кальций-магневых силикатов. Синтез подобных соединений описывает ряд авторов. А. С. Плачиндой и др. [121] получены кальцийзамещенные силикатные гели при взаимодействии силикатного геля с растворами гидроокиси кальция, причем поглощение кальция эквивалентно содержанию групп OH^- на поверхности скелета. В. Е. Белоусова и др. [11] исследовали процесс хемосорбции двухвалентного никеля гелем кремнекислоты. Особенно велика скорость хемосорбции в первые минуты опыта. Поглощение силикатным гелем ионов кальция было доказано экспериментами с использованием меченых атомов [54]. Гелем поглощено 88 % ионов кальция из 0,01 н раствора хлористого кальция. Другой особенностью геля является то, что он не поглощает сульфат-ион. Г. Е. Дмитриевский и др. [51] отмечают, что магний сорбируется намного активнее, чем кальций, причем растворимость в щелочах формирующихся при этом кальций-магний-силикатных гелей в 5 раз меньше по сравнению с чистым силикатным гелем. Это хорошо согласуется с выводом Пантера о том, что гелем сорбируются те элементы, которые образуют с его каркасом труднорастворимые соединения [169].

Наличие в геле жидкой фазы создает благоприятные условия для диффузии в гель веществ из контактирующего раствора. Скорости диффузии ионов в гелях сопоставимы со скоростями их движения в сплошных водных растворах (табл. 2.2). При контакте геля с раствором электролита, состав которого отличен от состава интермицеллярной жидкости, начинается встречная диффузия ионов из раствора в гель и наоборот. В этом случае, если движущиеся навстречу друг другу ионы вступают в реакцию с образованием труднорастворимых соединений, в гелях формируются кристаллы, которые в большинстве случаев имеют правильную форму.

Причины образования кристаллов правильной и четкой формы обусловлены рядом особенностей гелей [37, 175]:

- в гелях отсутствуют конвекционные потоки, поэтому растворенное вещество к кристаллу доставляется только за счет диффузии;
- сам гель не образует центры кристаллизации, подавляет зародышеобразование кристаллов, поэтому формирующиеся немногочисленные кристаллы могут быть довольно крупными;
- гель ввиду эластичности не препятствует росту кристаллов и практически не оказывает давления на их грани.

Скорость роста кристаллов зависит от ряда факторов, главными из которых являются плотность геля, исходные концентрации реагирующих веществ, температура, длина пути реагирующих веществ и др. [93]. Указанные свойства гелеобразных сред используются в минералогии для выращивания кристаллов. Размеры кристаллов колеблются от долей миллиметра до 2-3 см. Для выращивания кристаллов чаще всего применяют силикатные гели. Кристаллы, выращенные в алюмосиликатных гелях, загрязнены алюминием [37].

При выращивании кристаллов применяют различные методики [37, 93, 188, 195], которые можно свести к трем (рис. 3.1). Рассмотрим схемы этих методик на примере условий роста кристаллов оксалата кальция.

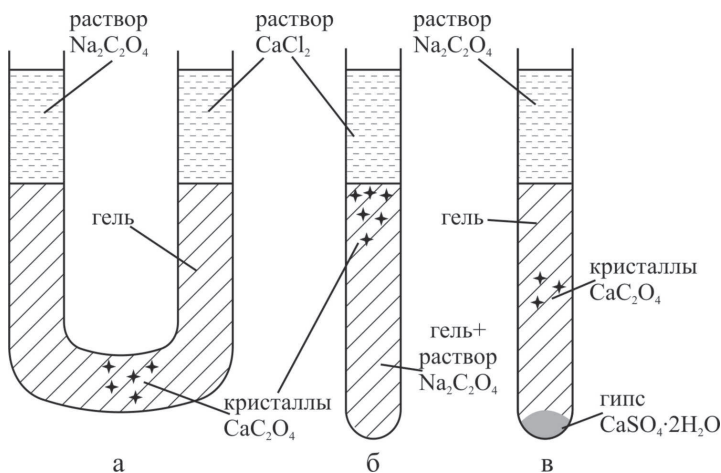


Рис. 3.1 Основные схемы, применяемые при выращивании кристаллов в гелях (на примере оксалата кальция)

1. Растворы, содержащие реагирующие компоненты (оксалат-ион и ион кальция), находятся в различных коленах U - образной трубки, нижняя часть которой заполнена гелем. Диффундируя в гель во встречном направлении, ионы взаимодействуют между собой. В результате в нижней части трубки образуются кристаллы оксалата кальция (рис. 3.1 а).

2. Один из реагентов (например, оксалат-ион) находится в интермицеллярной жидкости геля, а другой ион (кальций) диффундирует из раствора, контактирующего с гелем (рис. 3.1 б).

3. Источником реагентов служат твердая растворимая соль (например, гипс), внедренная в гель и контактирующий с гелем раствор (рис. 3,1 в). Об-

разование кристаллов при выращивании их по схеме б (рис. 3,1) происходит в пределах чередующихся слоев в результате так называемых ритмических реакций Лизеганга [169]. Рост кристаллов в лабораторных условиях происходит довольно быстро: от 2-3 до нескольких десятков суток. По мнению ряда исследователей [37, 159, 169], ритмические реакции в природных гелеобразных средах являются причиной полосчатости агатов, некоторых руд и др.

Состав и свойства ЩАС-геля. ЩАС-гель готовится путем добавления в жидкое стекло комплексного отвердителя. Состав и соотношение исходных компонентов для приготовления геля описаны в разделе 1.3. После сливания растворов отвердитель частично нейтрализует щелочь, и образуется золь кремнекислоты. В результате гидролиза сернокислого алюминия образуются комплексные соединения алюминия с гидроксильной группой, имеющие значительный положительный заряд, которые взаимодействуют с кремнекислотой с образованием алюмосиликатных комплексов. После того как полностью израсходуется буферная емкость отвердителя, начинается непрерывный гидролиз сернокислого алюминия, что ведет к поликонденсации кремневой кислоты и образованию алюмосиликатных комплексов [30, 32]. Возможно, часть алюминия в комплексном отвердителе связала в растворимый оксалатный комплекс $\text{Al}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}$ [62, 102]. Разрушение этого комплекса в результате гидролиза приводит к постепенному поступлению алюминия в сферу реакции гелеобразования. В пользу данного предположения говорит тот факт, что при добавлении к комплексному отвердителю растворов солей кальция выпадение оксалата кальция происходит не мгновенно, а спустя некоторое время, необходимое для разрушения алюмооксалатного комплекса.

В состав интермицеллярной жидкости ЩАС-геля входят сульфат натрия (около 12 г/л), оксалат натрия (17,5 г/л). Содержание кремнезема в форме силикат-ионов составляет около 40 г/л. С неотвержденным силикатом натрия связано до 33 г/л гидроокиси натрия [35]. Алюминий в интермицеллярной жидкости отсутствует, так как при принятых соотношениях исходных компонентов он полностью входит в состав скелета геля. При промывании геля дистиллированной водой указанные компоненты выносятся в раствор, при этом прочность гелей не изменяется. Скелет геля практически нерастворим в воде [30]. При подводном хранении в процессе старения объем ЩАС-геля не меняется.

3.3. Исследования взаимодействия щавелевоалюмосиликатного золя с подземными водами

В процессе инъекции формируется зона, где ЩАС-золь смешивается с подземными водами. В этой зоне протекают различные химические и фи-

зико-химические процессы, которые во многом определяют состав формирующихся постинъекционных растворов, а также могут повлиять на проницаемость пород вследствие осаждения твердой фазы.

Изучение закономерностей процессов, происходящих при смешивании ШАС-золя с подземными водами, в лабораторных условиях производилось путем приготовления смесей золя с растворами электролитов в различных соотношениях, исходя из того, что в зоне разбавления инъекционный раствор имеет концентрацию от исходной до нулевой. В приготовленных смесях исследовались: 1) изменение их химического состава во времени; 2) особенности гелеобразования; 3) состав и микростроение формирующихся гелей.

ШАС-золь разбавлялся растворами индивидуальных солей и подземными водами верхнесоликамского водоносного горизонта. Золь готовился в соответствии с рецептурой, применяемой для инъекции в основании Камской ГЭС. Время гелеобразования — 1,5 часа — в условиях опыта достигалось при соотношении силиката натрия и отвердителя 100:42. Для разбавления золя применялись:

1) растворы солей с концентрацией, характерной для вод верхнесоликамского горизонта (г/л): CaSO_4 — 2,2; MgSO_4 — 1,5; MgCl_2 — 1,2; NaCl — 8,8;

2) вода из скважин 118, 225б, 248 основания Камской ГЭС (верхнесоликамский водоносный горизонт), отвечающая различным типам; химический анализ вод показал следующее (г/л) соответственно: Ca — 1,17; 0,23, 0,42; Mg — 0,85, 0,04, 0,20; Na — 9,81, 0,41, 1,04; Cl — 13,4, 0,24, 0,38; SO_4 — 8,42, 1,44, 3,26; HCO_3 — 0,01, 0,17, 0,17; CO_3 — 0,02, нет, нет; в водах из скважин 118 и 248 качественно определено железо, в воде из скв. 118 наблюдался осадок черного цвета;

3) дистиллированная вода.

Количество добавляемого в растворы золя (% общего объема раствора) составляло 5, 10, 20, 30, 50, 75. При большем количестве золя в растворе быстро образовывался гель. Приготовленные смеси объемом 0,5 л помещались в герметично закрывающиеся колбы для исключения взаимодействия щелочи раствора с углекислым газом воздуха. Через определенные сроки (от 1 часа до 8 месяцев) растворы анализировались. Рассмотрим изменения, происходящие в смесях.

Золь — дистиллированная вода. Разбавление золя существенно влияет на время гелеобразования. При разбавлении золя 3:1, 1:1, 1:2,3 время гелеобразования составляет соответственно 3,3 часа, 1 сутки и 12 суток. При разбавлении 1:4 более объемный гель вообще не образуется, происходит помутнение раствора и выпадение небольшого количества хлопьев (менее 1 % объема за время опыта). Изучение хлопьев из смеси с разбавлением 1:4 на просвечиваемом электронном микроскопе показало, что первоначально в растворе выпадают относительно небольшие частицы, которые образуют рыхлые аг-

регаты со сквозными отверстиями и неровными краями (рис. 3.2 а, 10 суток хранения). Дальнейшая коагуляция мелких частиц приводит к образованию плотных агрегатов округлой формы (рис. 3.2 б, 100 суток хранения). Разбавление золя приводит к уменьшению его водородного показателя, причем наиболее интенсивно в области небольших разбавлений – до 1:100 и при разбавлениях больше 1:800 (рис. 3.3).

Золь – раствор NaCl. Время гелеобразования в этих смесях меньше, чем при разбавлении золя дистиллированной водой:

Таблица 3.1 Время гелеобразования в различных смесях при соотношении золь и разбавителя 3:1

Разбавитель золя	Неразбавленный золь	Дистиллированная вода	NaCl	CaSO ₄	MgSO ₄	MgCl ₂	Вода из скв. 225б	Вода из скв. 248	Вода из скв. 118
Время гелеобразования, мин	90	200	120	80	145	135	120	150	30

Отмечено образование геля и при разбавлениях 1:4, 1:9, при этом объем гелей составил соответственно 70 % и 50 % объема раствора. В растворах наблюдалось выпадение хлопьевидного осадка при смешивании с раствором хлористого натрия.

Золь – раствор CaSO₄. В этих смесях также происходит сокращение времени гелеобразования по сравнению с опытами с дистиллированной водой (табл. 3.1). Наблюдаемый визуально характер гелеобразования в данных смесях подобен предыдущим, с той лишь разницей, что объем образующегося геля несколько меньший. Например, при разбавлении 1:4 через месяц он составил 20 % объема раствора. Наличие в растворе кальция приводит к значительному снижению концентрации кремнезема и оксалат-иона, что можно объяснить их взаимодействием с образованием твердой фазы. При низких исходных концентрациях кальция он не обнаружен в растворе уже через один час после начала опыта (табл. 3.2). При разбавлении золя 1:19 после резкого снижения концентрации кальция в течение первого часа присутствие этого катиона в небольшом количестве отмечено на более длительных сроках.

Золь – раствор MgSO₄, золь – раствор MgCl₂. Особенности процессов, происходящих в этих системах, вызваны наличием ионов магния в смесях. Этот ион, как и кальций, довольно быстро исчезает из раствора, при этом

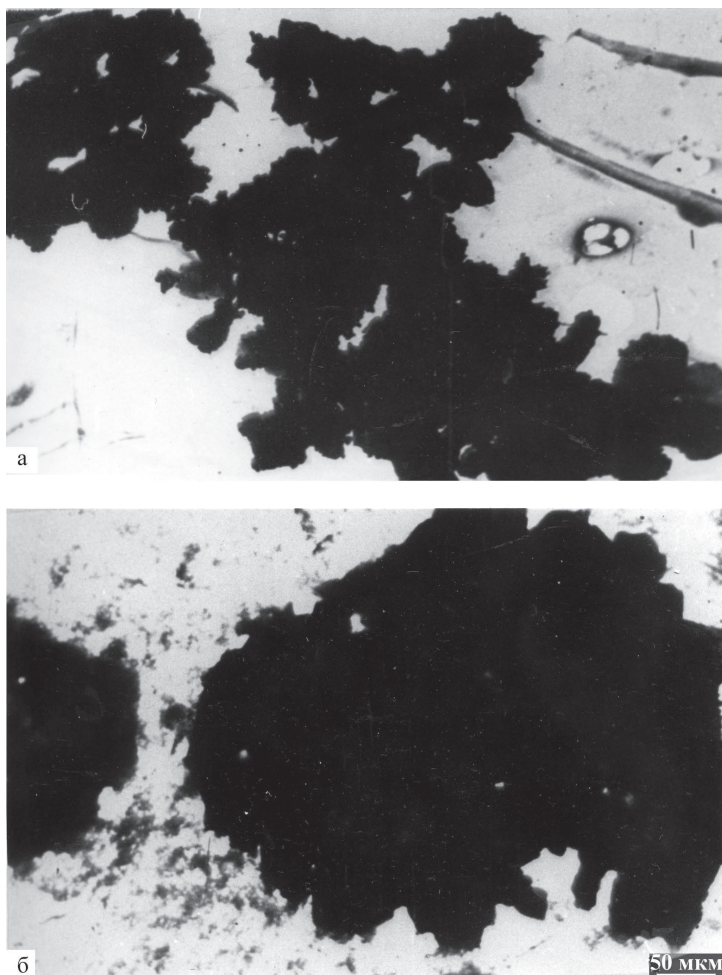


Рис. 3.2. Частицы, образовавшиеся в ШАС-золе, разбавленном в 4 раза дистиллированной водой: а – через 10 суток, б – через 100 суток

снижается концентрация кремнезема и, в меньшей степени, оксалат-иона. После того как прореагировал весь магний, содержание других компонентов раствора в целом стабилизируется. Изменение во времени концентрации компонентов смеси золь – раствор сернокислого магния показано в табл. 3.2. Для раствора хлористого магния получены подобные результаты.

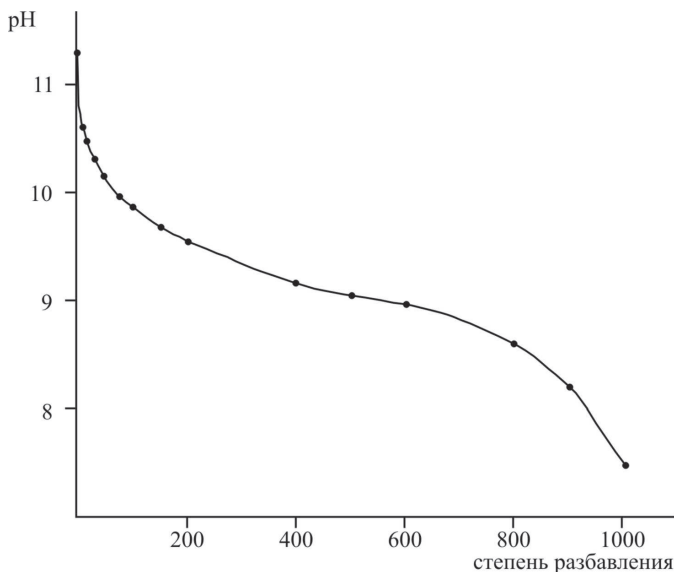


Рис. 3.3. Изменение водородного показателя ЩАС-золя при разбавлении его дистиллированной водой

Золь — вода из скважин 2256, 248, 118. В этих смесях также происходит уменьшение со временем как компонентов золя, так и ионов кальция и магния, причем с увеличением минерализации разбавителя им процесс протекает интенсивнее (табл. 3.3). Время гелеобразования при разбавлении золя водой из скважины 118, имеющей самую высокую минерализацию, значительно меньше, чем при разбавлении другими электролитами, и даже меньше, чем у неразбавленного золя (табл. 3.1). При смешивании природных вод и золя при всех соотношениях выпадает хлопьевидный осадок. Наибольшее его количество (80 % объема) образовалось в опыте с водой из скважины 118 при соотношении 1:9. С течением времени в колбах образуется объемный гель, нижняя часть которого включает в себя хлопьевидный осадок.

Проведенные исследования показывают, что на процесс гелеобразования существенное влияние оказывают состав и концентрация электролита, которым разбавляется золь. Общей тенденцией в изученных смесях будет взаимное уменьшение концентраций как кальция и магния — компонентов разбавителя, так и компонентов золя — кремнезема и оксалат-иона. Уменьшение концентрации кальция связано с различными процессами. Во-первых, он взаимодействует с оксалат-ионом с образованием труднорастворимого оксалата кальция, во-вторых, реагирует с ионными

Таблица 3.2. Изменение во времени химического состава смесей ЩАС-золя с растворами солей

Смесь золь — раствор CaSO ₄														
Соотношение золь/раствор Определяемые компоненты, мг-экв/л		1:4					1:9					1:19		
		SiO ₂	C ₂ O ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SiO ₂	C ₂ O ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SiO ₂	C ₂ O ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
Время от начала опыта	0	1706	65,6	23,6	-	853	32,8	26,8	-	426	16,4	28,2	-	
	1 час	1599	44,5	нет	-	476	20,2	нет	-	142	-	3,2	-	
	2 часа	1371	44,5	нет	-	476	22,3	нет	-	142	7,6	1,9	-	
	1 сут.	1261	44,0	нет	-	-	-	-	-	142	5,0	1,2	-	
	7 сут.	595	44,5	нет	-	419	22,3	нет	-	161	4,0	1,2	-	
	1,5 мес.	гелеобразование				342	20,2	нет	-	152	-	0,6	-	
	3 мес.					гелеобразование					152	4,0	следы	-
	8 мес.										122	4,0	следы	-
							Всего прореагировало, %							
							67	76	100	-				
Смесь золь — раствор MgSO ₄														
0	1706	65,8	-	20,4	853	32,8	-	22,9	426	16,4	-	24,4		
1 час	1690	45,5	-	0,13	773	23,8	-	2,16	320	7,4	-	4,0		
2 часа	1606	40,3	-	нет	-	23,8	-	0,50	320	5,1	-	-		
1 сут.	1606	40,1	-	нет	760	20,1	-	следы	320	5,1	-	0,6		
7 сут.	-	40,1	-	нет	760	20,1	-	нет	273	5,1	-	нет		
1 мес.	1606	40,3	-	нет	706	20,1	-	нет	273	-	-	нет		
4 мес.	гелеобразование				706	20,1	-	нет	60	-	-	нет		
						Всего прореагировало, %								
						86	69	-	100					

Таблица 3.3. Изменение во времени химического состава смесей ШАС-золя с водами верхнесоликамского горизонта

Смесь золь — вода из скв. 225 б											
Соотношение золь/раствор		1 : 4				1 : 9				1 : 19	
Определяемые компоненты, мг·экв/л		SiO ₂	C ₂ O ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SiO ₂	C ₂ O ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SiO ₂	Mg ²⁺
Время от начала опыта	0	1706	65,6	9,36	2,64	835	32,8	10,53	2,97	426	16,4
	1 час	-	50,7	нет	1,6	631	25,0	нет	2,5	160	7,5
	2 часа	1326	50,7	нет	нет	560	25,0	нет	1,6	120	7,5
	1 сут.	1320	45,5	нет	нет	-	27,0	нет	нет	120	7,5
	7 сут.	гелеобразование				606	25,0	нет	нет	106	7,5
	1 мес.	гелеобразование				гелеобразование					
	3 мес.										
6 мес.							Всего прореагировало, %		77	73	
Смесь золь — вода из скв. 248											
Время от начала опыта	0	1706	65,6	16,9	13,0	854	32,8	19,1	14,6	426	16,4
	1 час	1360	-	нет	нет	546	24,0	нет	нет	206	4,0
	2 часа	1296	50,7	нет	нет	466	24,0	нет	нет	120	4,0
	1 сут.	1271	40,3	нет	нет	466	24,0	нет	нет	120	4,0
	7 сут.	гелеобразование				426	21,0	нет	нет	126	4,0
	1 мес.	гелеобразование				гелеобразование					
	3 мес.										
						Всего прореагировало, %		66,0	4,0	нет	нет
								86,0	69	-	100

формами силикатов, что ведет к образованию гидросиликатов кальция, в-третьих, в растворах с высокой щелочностью возможно образование промежуточного соединения — гидроокиси кальция. Уменьшение концентрации магния вызвано двумя последними процессами. Кроме указанных процессов в растворе происходит осаждение коллоидного кремнезема под действием растворов электролитов. Совместное существование некоторое время в растворе оксалат-иона и иона кальция можно объяснить тем, что оксалат-ион образует с алюминием растворимый комплекс [102], который препятствует мгновенной реакции с кальцием.

Состав гелей и их микростроение. Гели, образующиеся при разбавлении золя растворами электролитов, имеют специфические особенности, для выявления которых были изучены их состав и структура.

Состав твердой фазы гелей изучался на многоканальном рентгеновском спектрометре СРМ-18. Перед анализом гели отмывались дистиллированной водой для того, чтобы в анализируемое вещество не попали компоненты интермицеллярной жидкости геля. Состав и соотношение разбавителя ЩАС-раствора даны в табл. 3.4. При наличии в разбавителе ионов кальция и магния они участвуют в формировании твердой фазы геля, содержание одновалентных ионов натрия и калия уменьшается. Данная зависимость отчетливей выражена при больших разбавлениях золя. Ионы кальция и магния увеличивают степень мобилизации кремнезема (разбавление 1:1).

Рентгенометрическое исследование показало, что все гели рентгеноаморфны, независимо от состава и соотношения разбавителя. Их рентгенограммы имеют идентичный характер с широким галоупиком с максимумом в области 20-29°. Признаки кристаллизации не обнаружены при хранении образцов в водной среде в течение 1,5 года.

Термический анализ отмытых гелей, выполненный З.А. Кривошеевой, показал, что при низкой минерализации разбавителя независимо от его состава гель содержит одинаковое количество воды, близкой по характеру связей. По термограммам фиксируются две формы воды: первая удаляется при температуре 65-70°, вторая — при температуре 115-120°. При более высокой минерализации разбавителя общее содержание воды в геле увеличивается и присутствуют ее более прочносвязанные формы. При разбавлении золя раствором хлористого натрия преобладает вода, удаляемая при температуре 100°, и небольшое количество — при 120° и 135°. В том случае, когда разбавителем является вода из скважины 118, термограмма показывает малое содержание воды, удаляющейся при температуре 100°, и преобладающую форму воды, удаляющуюся при температуре 130-140°. На термограммах геля, полученного разбавлением золя раствором хлористого натрия и водой из скважины 118, содержащей большое количество этой соли, на кривой ДТА обнаруживается экзотермический пик в области тем-

Таблица 3.4 Химический состав твердой фазы гелей

Разбавитель золя	Минерализация разбавителя, г/л	Соотношение золь - разбавитель	Химический состав, %			
			Na ₂ O	MgO	CaO	SiO ₂
Исходный гель	-	-	7,3	0,4	0,2	64,0
H ₂ O	-	1:1	7,7	0,4	0,2	65,0
NaCl	8,8	1:1	7,8	0,4	0,2	66,1
MgCl ₂	1,2	1:1	7,5	0,7	0,2	69,0
MgSO ₄	1,5	1:1	7,3	0,8	0,2	70,5
CaSO ₄	2,2	1:1	6,3	0,5	1,4	68,4
CaSO ₄	2,2	1:19	5,9	0,5	2,3	52,1
Вода из скв. 225 б	2,5	1:1	6,5	0,6	1,2	69,7
Вода из скв. 248	5,5	1:1	6,7	0,6	1,0	72,2
Вода из скв. 118	33,7	1:1	5,5	0,7	1,4	63,8
Вода из скв. 118	33,7	1:4	4,8	0,9	1,7	63,1

ператур 460-480°, свидетельствующий об изменении структуры геля в сторону ее уплотнения без изменения в составе вещества.

Исследование структуры гелей, выполненное совместно с Е. Н. Коломенским, проводилось при помощи сканирующего электронного микроскопа КВИКСKAN-107. Гели, приготовленные при соотношении золя и разбавителя 1:1, замораживались жидким азотом и подвергались сублимационной сушке в вакууме по методике, разработанной В. И. Осиповым и В. Н. Соколовым [117]. Подобная операция, по мнению Г. Гениша [37], не нарушает структуру геля. Как показали исследования, гели имеют существенно различное микростроение в зависимости от состава разбавителя (рис. 3.4). Для выяснения структурных особенностей гелей был проведен количественный анализ электронно-микроскопических снимков на анализаторе структур марки «Лейтс».

Для анализа структур гелей применялась так называемая булевская схема [78]. Гель, полученный при разбавлении золя дистиллированной водой, имеет однородную по всему объему структуру, о чем свидетельствует почти полное совпадение распределения структурных элементов с булевской схемой (рис. 3.5). Некоторые отклонения функции распределения пересечения пор $P(l)$ (где l – диаметр пор) от булевской схемы наблюдаются для гелей, разбавителем в которых был раствор хлористого натрия, что, очевидно, связано с дополнительным коагулирующим действием этой соли (рис. 3.4 б). Наиболее существенные отклонения от булевской схемы име-

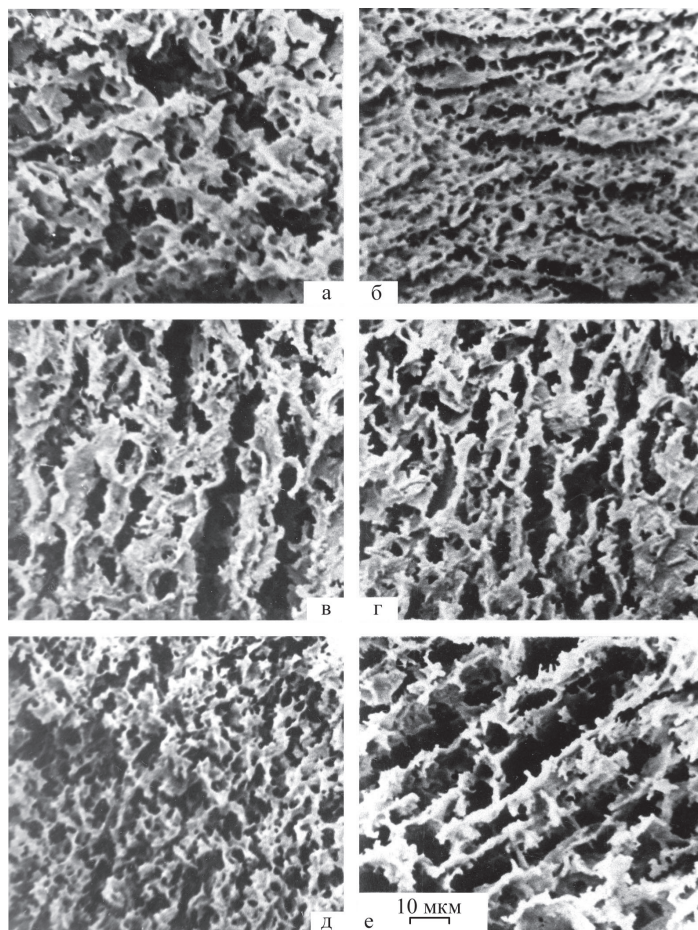


Рис. 3.4. Микростроение гелей, полученных из ЩАС-золя, разбавленного различными электролитами: а – дистиллированной водой, б – хлоридом натрия, в – сульфатом кальция, г – хлоридом магния, д – водой из скв. 248, е – водой из скв. 118 (увеличение одинаковое на всех снимках)

ют гели, полученные при разбавлении золя растворами, содержащими двухвалентные ионы кальция и магния (рис. 3.5), что указывает на формирование более массивной структуры геля с меньшим количеством крупных пор. Отметим, что угол наклона кривой относительно горизонтальной оси, который характеризует количество пор на единицу площади, прямо пропорционален степени мобилизации кремнезема в процессе гелеобразования

(рис. 3.5, табл. 3.4). Таким образом, интенсивная коагуляция приводит к образованию более массивных структур. Структурные изменения вызваны наличием в золе кальция и магния, которые активно влияют на процесс гелеобразования и частично входят в состав скелета геля. Гели приобретают полосчатую структуру (рис. 3.5 в, г, е), существенно отличную от изотропной структуры геля без добавок солей (рис. 3.4 а).

Результаты структурных исследований показывают, что добавление в золь различных по составу и минерализации электролитов приводит к формированию гелей с различной структурой. Таблица 3.5 дает представление о наиболее важных структурных особенностях гелей. Например, при разбавлении золя водой из скважины 248 происходит образование геля с ажурной, мелкопористой структурой, с высокими значениями удельного периметра и закрытым характером пористости.

Таблица 3.5. Структурные характеристики гелей

Разбавитель золя	Удельный периметр пор	Средний линейный размер пор	Число связности пор
H ₂ O	0,19	9,5	153
NaCl	0,26	7,0	284
CaSO ₄	0,19	9,4	146
MgCl ₂	0,20	7,2	150
Вода из скв. 248	0,25	6,1	255
Вода из скв. 118	0,13	12,3	81

Добавление в золь воды с высокой минерализацией (скв. 118) обуславливает формирование полосчатой, крупнопористой структуры с низкими значениями удельного периметра пор, связанных между собой в систему каналов.

Проведенные исследования показали, что при смешивании ЩАС-раствора и растворов электролитов на гелеобразование действуют два фактора, один из которых замедляет, другой ускоряет этот процесс. К первому фактору относится разбавление золя, т.е. уменьшение концентрации реагирующих растворов, в результате чего резко увеличивается время гелеобразования. Это ведет к уменьшению прочности формирующихся гелей [30, 72], а при больших разбавлениях они не образуются вообще.

Второй фактор — коагулирующая способность катионов. Дополнительными коагуляторами являются двухвалентные катионы кальция и магния. Кроме коагулирующего действия эти катионы при взаимодействии с силикатом в щелочных условиях ведут к формированию адсорбционно-конденсационных новообразований [148]. Следует отметить, что в состав твердой фазы гелей входят компоненты разбавителя, причем с увеличением

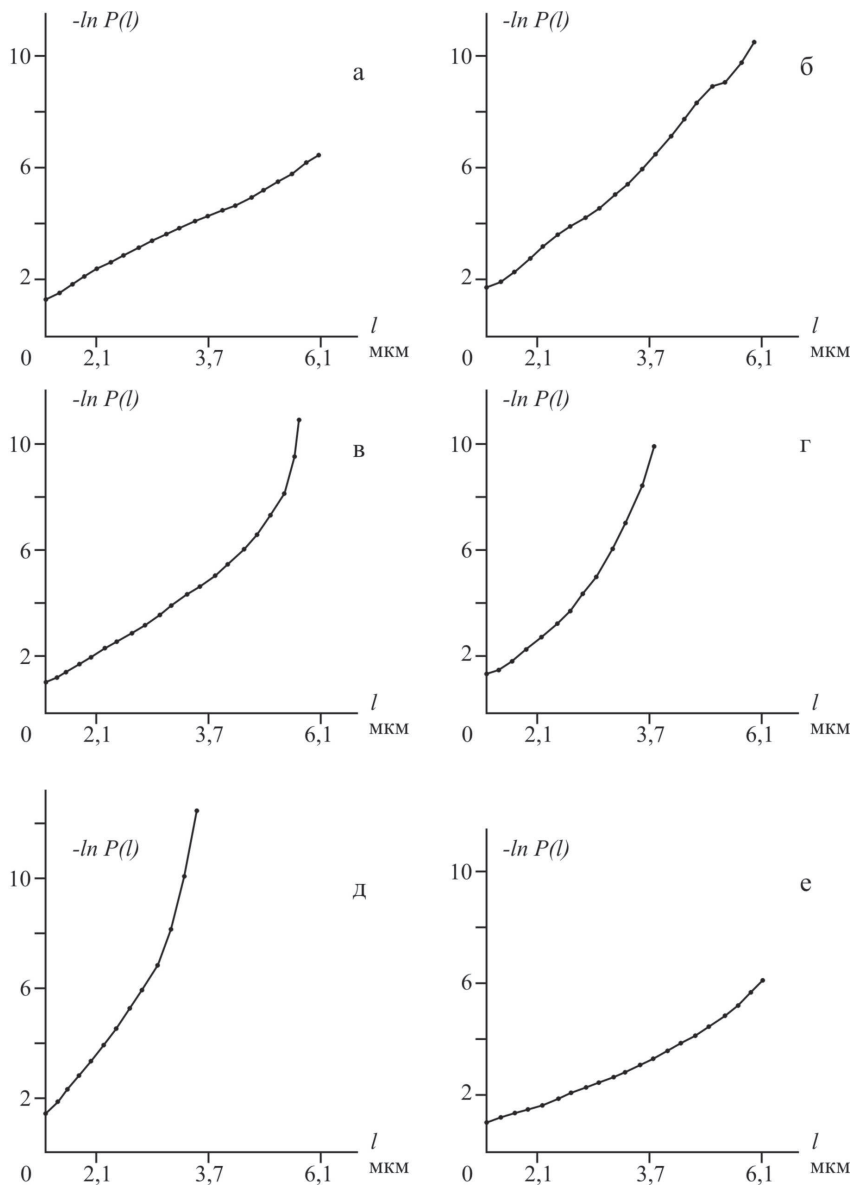


Рис. 3.5. Графики функции распределения пересечения пор $P(l)$ после логарифмирования для гелей, полученных при разбавлении ШАС-золя: а – дистиллированной водой, б – хлоридом натрия, в – сульфатом кальция, г – хлоридом магния, д – водой из скв. 248, е – водой из скв. 118

разбавления их количество возрастает. С повышением минерализации растворов и содержания в них кальция и магния гелеобразование происходит при значительном разбавлении раствора, что в условиях закрепляемого массива может увеличить тампонажный эффект ЩАС-рецептуры. Добавление в золь катионов кальция и магния приводит к тому, что в процессе гелеобразования происходит формирование упорядоченных структур.

3.4. Исследование взаимодействия щавелевоалюмо-силикатного геля с растворами электролитов

Процессы, происходящие при контакте гелей с растворами электролитов, если исходить из теоретических представлений и экспериментальных исследований в области синтеза цеолитов и крекирующих катализаторов, выращивания кристаллов в гелях, хроматографии и др., играют существенную роль в преобразовании свойств как гелей, так и растворов. В технической мелиорации грунтов к гелю закрепленного массива сформировалось отношение как к источнику техногенных компонентов, выносящихся в подземные воды, а его скелет считался мало изменяющимся компонентом. В ряде работ [30, 127, 137] показано, что при контакте геля с дистиллированной или слабоминерализованной водой в раствор может перейти значительная часть силиката интермицеллярной жидкости геля (60–75 % общего количества, вносимого в грунт), а также значительное количество щелочи. Результаты опытов априорно распространялись на массивы с минерализованными подземными водами, где, как предполагалось, за счет выноса из геля будут формироваться обширные зоны, содержащие щелочные кремнеземсодержащие растворы [135]. В некоторых работах есть указания на положительную роль электролитов, контактирующих с закрепленными образцами. В. П. Ананьев и др. [5] экспериментально установили, что с увеличением минерализации подземных вод уменьшается выщелачивание кремнезема из силикатизированных лёссовых грунтов. С. Е. Чаликова и Е. В. Степанова [163] показали, что воздействие солей магния на силикатизированные песчаные образцы увеличивают их прочность. Однако в этих работах не рассматриваются процессы, происходящие при диффузии в гель компонентов контактирующего раствора, особенности диффузии компонентов жидкой фазы геля в минерализованные воды. При закреплении грунтов гелеобразующими растворами не учитывается тот факт, что гелеобразные среды являются благоприятными для роста кристаллов.

После завершения инъекции в теле и на периферии противодиффузионной завесы Камской ГЭС ЩАС-гель будет контактировать с минерализованными подземными водами. Для изучения процессов в возникающей при этом системе гель – подземные воды (рис. 2.1) в лабораторных условиях про-

водилось исследование диффузии компонентов интермицеллярной жидкости ЩАС-геля в растворы солей и природные воды; изменения состава и структуры гелей при диффузии в гель компонентов контактирующих растворов; оценивалась возможности роста кристаллов в ЩАС-геле.

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе изучались изменения во времени состава контактирующего раствора в статических условиях, на втором — при движении раствора по поверхности геля. Изучались также состав и структура гелей после взаимодействия с растворами электролитов.

На первом этапе для исследований были приготовлены ЩАС-гели, которые заливались растворами различных электролитов. Гели готовились при соотношении силиката натрия и отвердителя 100:42. Приготовленный золь объемом 5 мл помещался в пробирки диаметром 1,4 мм. После образования геля в пробирки заливались различные растворы в количестве 10 мл. Применялись следующие растворы: 1) вода из скважин 118, 225б, 248 в основании Камской ГЭС, состав которой отражает различные типы подземных вод; 2) растворы сернокислых солей магния и кальция с концентрацией, характерной для подземных вод основания Камской ГЭС; 3) концентрированные растворы хлоридов кальция и магния, сернокислого и хлористого натрия; 4) сернокислые соли двух- и трехвалентного железа; 5) дистиллированная вода.

Концентрации растворов приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6. Изменение состава, контактирующего с гелем раствора

Раствор или номер скважины	Срок, сут	Минерализация, г/л	Концентрация, мг-экв/л						
			Ca ²⁺		Mg ²⁺		ОН ⁻	SiO ₂	C ₂ O ₄ ²⁻
			исходная	конечная	исходная	конечная			
H ₂ O	97	-	-	-	-	-	270	1710	80,0
Na ₂ SO ₄	144	14,2	-	-	-	-	292	1558	84,4
NaCl	160	9,1	-	-	-	-	310	1820	81,5
MgSO ₄	144	1,53	-	-	25,4	нет	195	1460	74,3
MgCl ₂	144	25,0	-	-	525	125	нет	нет	20,3
CaSO ₄	97	1,21	17,8	нет	-	-	270	1460	33,4
CaCl ₂	144	18,5	333	93	-	-	нет	нет	следы
FeSO ₄	160	2,8	-	-	-	-	270	1650	81,5
Fe ₂ (SO ₄) ₃	160	5,6	-	-	-	-	160	360	70,4
Скв. 225 б	97	2,53	11,7	нет	3,3	нет	260	1510	6,8
Скв. 248	97	5,48	21,2	нет	16,3	нет	230	1420	5,7
Скв. 118	97	33,7	58,4	нет	69,5	нет	следы	следы	1,0

Пробирки герметизировались и хранились при комнатной температуре в течение 97-166 суток. Такие сроки хранения по данным предварительных опытов обеспечивают наступление равновесного или близкого к нему со-

стояния. Затем гель извлекался из пробирки, изучался на сканирующем электронном микроскопе КВИКСАН-107, рентгеновском дифрактометре ДРОН-0,5. После окончания опыта производился химический анализ растворов. Рассмотрим изменения, которые произошли в геле и растворе при их взаимодействии.

Дистиллированная вода. В растворе определены кремнезем, щелочь, оксалат-ион (табл. 3.6), диффундирующие из геля. Электронно-микроскопическое изучение геля показало, что он имеет довольно однородную ячеистую структуру (рис. 3.6 б). По сравнению со свежеприготовленным гелем (рис. 3.6 а) в исследуемом геле произошло существенное укрупнение размеров структурных элементов скелета и пор. Оба геля рентгеноаморфны.

Растворы NaSO_4 и NaCl . Концентрации диффундировавших в раствор компонентов близки к их концентрациям в опыте с дистиллированной водой, содержание кремнезема несколько ниже (табл. 3.6). Гели рентгеноаморфны и обладают более плотным микростроением по сравнению со свежеприготовленным.

Раствор MgSO_4 . В растворе выявлены кремнезем, щелочь, оксалат-ион, а ион магния отсутствует. В нижней части раствора через 10 суток образовался новый гель, объем которого к концу опыта достиг 46 % объема исходного геля. Новый гель — полупрозрачный, менее плотный. Между старым и новым гелем выделяется четкая поверхность раздела в виде белого слоя толщиной около 0,5 мм. Электронно-микроскопическое исследование нового геля показало, что он отличается как от исходного геля (рис. 3.6 а), так и от свежеприготовленного геля (рис. 3.6 в). Его структурные элементы имеют большие размеры, более уплотненные, иногда со сквозными отверстиями (рис. 3.6 г). Гель менее плотный по сравнению с исходным, структура его более упорядоченная, на отдельных участках можно наблюдать полосчатость. Исходный гель имеет также более плотную структуру по сравнению со свежеприготовленными. Гели рентгеноаморфны.

Раствор MgCl_2 . В растворе уменьшилась концентрация магния на 400 мг-экв/л, кремнезем и щелочь отсутствуют полностью (табл. 3.6). Концентрация оксалат-ионов в 4 раза меньше, чем в опыте с дистиллированной водой. Через три дня после начала опыта верхняя часть геля приобрела более белый тон на глубину 1,5 см. К концу опыта изменение цвета распространилось на глубину 3 см. Изменились механические свойства геля. Он превратился в тело, обладающее некоторой хрупкостью. Требуется значительное усилие, чтобы внедрить в такой гель стеклянную палочку, при этой попытке он рассыпается на куски. Под электронным микроскопом гель представляет практически однородную массу, образованную мельчайшими структурными элементами, плотно прилегающими друг к другу (рис. 3.6 д). В геле произошло образование кристаллов и оолитов дигидрата ок-

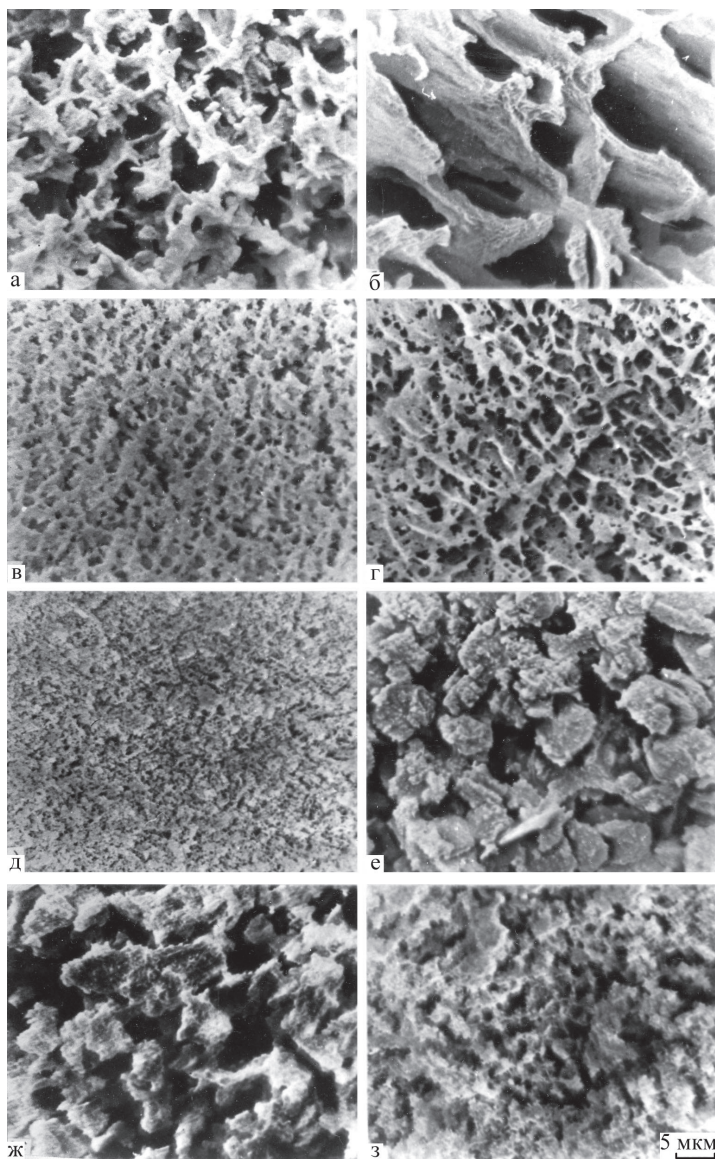


Рис. 3.6. Микростроение гелей: а — свежеприготовленный гель; гели после взаимодействия: б — с дистиллированной водой; с растворами: в — $MgSO_4$; д — $MgCl_2$; е — $CaSO_4$; ж — с водой из скв. 248; з — с водой из скв. 118; г — гель, образовавшийся в растворе $MgSO_4$ (увеличение одинаковое на всех снимках)

салата магния, определенных рентгенографически по линиям с $d = (4,89, 3,17, 2,38, 2,04, 1,86) \cdot 10^{-10}$ м. Размер кристаллов и оолитов достигает 1 мм (рис. 3.7). Кристаллы и оолиты неравномерно распределены по объему геля. Они концентрируются в слоях толщиной 2-3 мм — так называемых кольцах Лизеганга, которые чередуются со слоями чистого геля. Слои выделяются по более светлому тону, проявляющемуся при высыхании геля на воздухе.

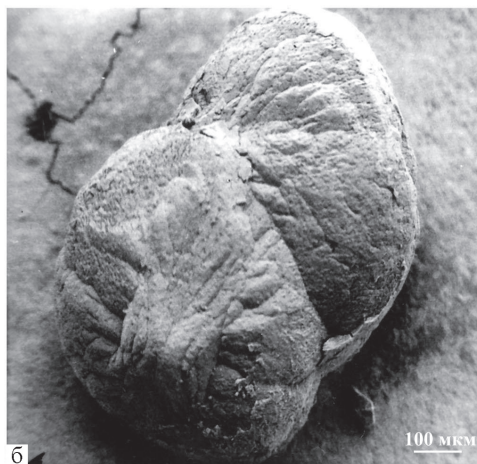
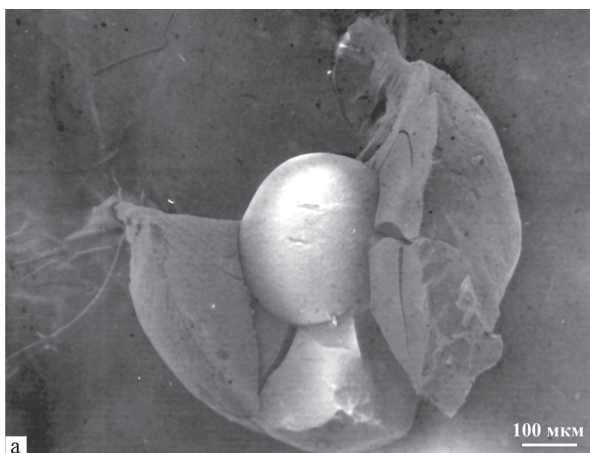


Рис. 3.7. Оолит (а) и кристаллы (б) дигидратата оксалата магния, образовавшиеся в геле при его взаимодействии с раствором хлористого магния

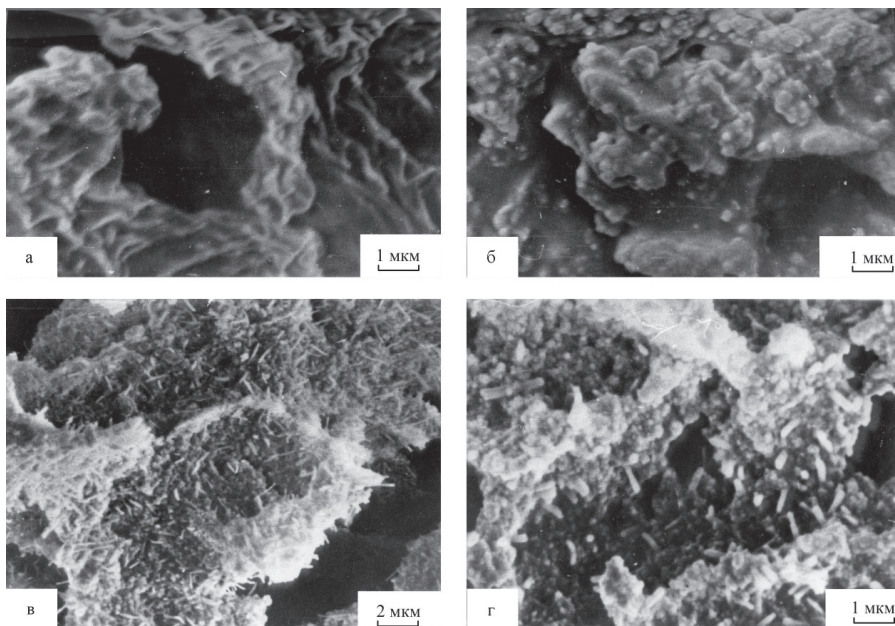


Рис. 3.8. Микростроение поверхности структурных элементов геля после взаимодействия: а — с дистиллированной водой; б — с раствором сернокислого кальция; с водой из скв.: в — 225б, г — 248

Раствор CaSO_4 . В растворе определены кремнезем, щелочь, оксалат-ион, отсутствует ион кальция. Изучение микростроения геля показало, что его структурные элементы укрупнились и приобрели округлую форму (рис. 3.6 е). Их поверхность покрыта новообразованиями (рис. 3.8 б), что делает ее более шероховатой по сравнению с гелем в опыте с дистиллированной водой (рис. 3.8 а). Рентгенографически в верхнем слое геля определены кристаллы оксалата кальция $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2,25 \text{H}_2\text{O}$ по линиям с $d = (6,18; 4,43; 2,77; 2,40; 2,24; 1,95; 1,90) \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Раствор CaCl_2 . В этом растворе отсутствуют кремнезем, щелочь, оксалат-ион, концентрация кальция снизилась на 240 мг-экв/л. Микростроение геля, его внешний вид и механический состав близки к гелю, взаимодействующему с раствором хлористого магния. В геле образовалось большое количество кристаллов оксалата кальция $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2,25 \text{H}_2\text{O}$ размером до 0,2 мм (рис. 3.9 а). Кристаллы представляют собой сроски в виде четырехугольных звезд (рис. 3.9 б). Вокруг кристалла в геле образуется небольшая полость (рис. 3.9 в). Кроме оксалата кальция в геле обнаружено небольшое количество кристаллов гипса (рис. 3.9 г).

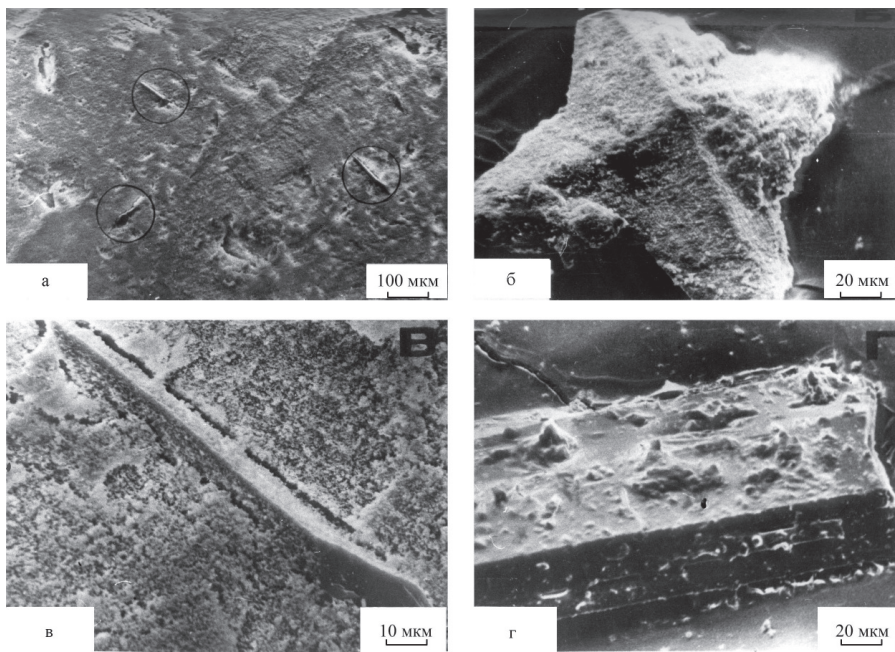


Рис. 3.9. Кристаллы оксалата кальция $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2,25 \text{H}_2\text{O}$ (а-в) и гипса (г), образовавшиеся в геле при его контакте с раствором хлористого кальция

Раствор FeSO_4 . Сразу после приливания к гелю раствора началось выпадение зеленовато-черного осадка, раствор в нижней части помутнел. Через сутки осадок покрылся бурыми хлопьями. К концу опыта толщина осадка достигла 2 мм, он превратился в гелеобразную массу с белой полоской посередине (рис. 3.10 а).

Раствор $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. В этом опыте отмечено интенсивное выпадение осадка, после чего в растворе сформировался гель, представляющий собой чередование бурых, белых и серо-белых полос различных оттенков, объем которого составил около 40 % исходного геля. На рис. 3.10 б показана неоднородная структура нового геля.

Вода из скважины 225 б. В этом растворе после взаимодействия с гелем отсутствуют ионы кальция и магния, обнаружены OH^- , SiO_2 , $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$, причем концентрация последнего чрезвычайно мала (табл. 3.6). Произошло образование нового геля в нижней части раствора, объем которого составил 24 % исходного. Микростроение геля аналогично гелям в опытах с растворами сернокислого кальция и сернокислого магния. Поверхность скелета геля покрыта микроскопическими игольчатыми кристаллами (рис. 3.8 в).

Вода из скважины 248. В целом картина в данном опыте аналогична описанной в предыдущем (рис. 3.6; 3.8). Некоторые отличия имеет процесс гелеобразования, что связано с наличием в воде ионов железа. Сразу после добавления раствора началось выпадение бурого хлопьевидного осадка, толщина которого достигла 1 мм. Затем бурый осадок покрылся белым. Через некоторое время образовался объемный гель (30 % объема исходного), в середине которого наблюдался тонкий, менее 1 мм, бурый, чрезвычайно неровный слой.

Вода из скв. 118. В этом растворе практически отсутствуют как ионы кальция и магния, так и OH^- , SiO_2 , $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$. На поверхности геля образовалась прочная белая корка толщиной около 3 мм, электронномикроскопическое изучение которой показало, что она состоит из плотного геля и большого количества кристаллов довольно правильной октаэдрической формы, а также разнообразных поликристаллических образований размером до 0,1 мм (рис. 3.11). Кристаллы представляют оксалат кальция $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2,25\text{H}_2\text{O}$, определенные по линиям рентгенограммы с $d = (6,20; 4,42; 2,77; 2,40; 2,24; 1,90) \cdot 10^{-10}$ м. Гель, расположенный ниже плотного слоя, по структуре похож на гели в опытах с растворами солей кальция и магния невысокой концентрации (рис. 3.6).

Для изучения возможности роста кристаллов в других гелях, применяемых для закрепления грунтов, были проведены опыты с рецептурой на основе эпоксидной смолы ТЭГ-1, разработанной для гидроизоляции пласта каменной соли в основании Рогунской ГЭС [34]. В процессе приготовления раствора эпоксидная смола разводилась не дистиллированной водой, как это предусмотрено в данной рецептуре, а растворами углекислого и сернокислого натрия, что не сказалось на времени гелеобразования и свой-

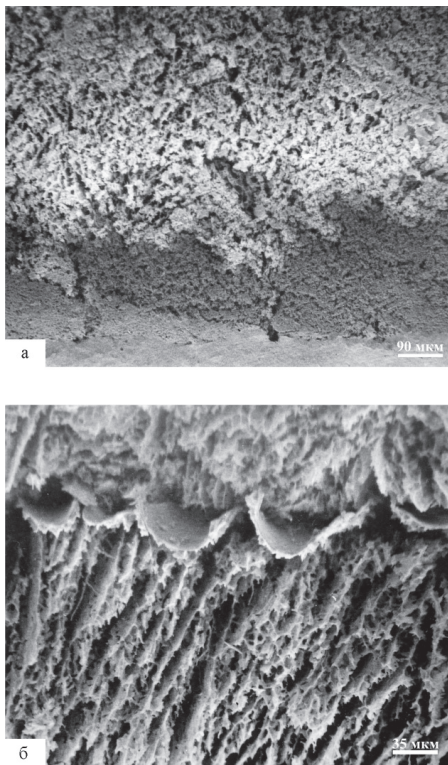


Рис. 3.10. Микростроение гелей, сформировавшихся в растворах солей железа: а – FeSO_4 , б – $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$

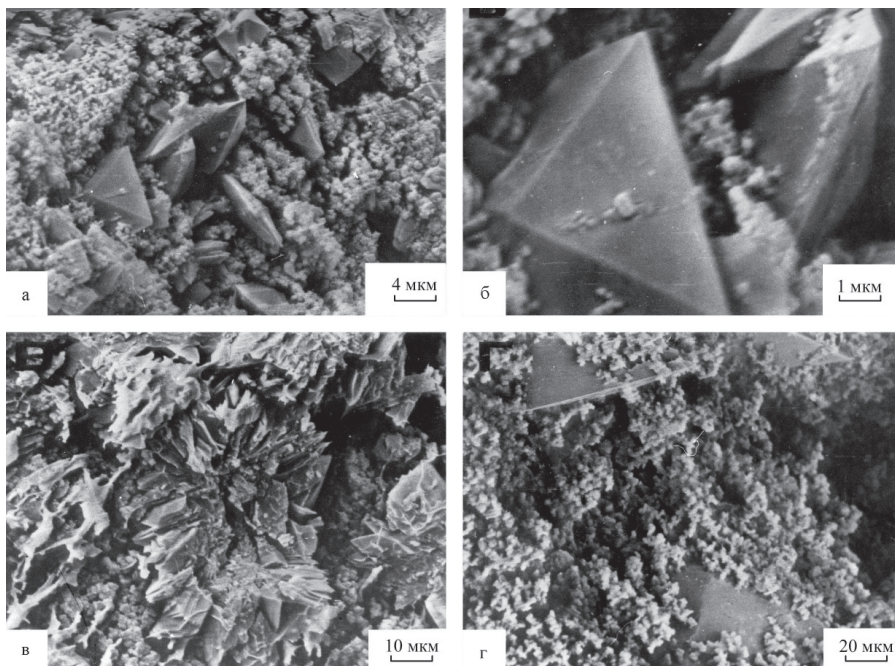


Рис. 3.11. Кристаллы оксалата кальция $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2,25 \text{H}_2\text{O}$, образовавшиеся в геле при его контакте с водой из скв. 118

ствах геля. Приготовленный раствор помещался в пробирки, а после образования геля в пробирки заливались растворы хлористого кальция или природные подземные воды из района створа Рогунской ГЭС. В опыте, где разбавителем эпоксидной смолы служил сернокислый натрий, на второй день началось образование «пушистых» кристаллических агрегатов гипса размером до 3 мм. Подобные кристаллы, по данным Нобукази [191], образуются в тех случаях, когда сульфат-ион находится в жидкой фазе геля и возникают в результате наложения многочисленных пластинчатых кристаллов и иксообразных двойников. В опыте с гелем, насыщенным углекислым натрием, образовалось большое количество оолитов и кристаллов CaCO_3 (рис. 3.12). Гель из прозрачного превратился в белый. Образование кристаллов произошло и в опытах с природными водами. Следует отметить, что возможность роста кристаллов существует и в других гелеобразных веществах, используемых при закреплении грунтов, например, в полиакриламиде, бентоните [191].

Для исследования изменения химического состава контактирующих растворов во времени была поставлена серия опытов, в которых 50 мл геля, приготовленного в бутылке диаметром 6,5 см, заливались 450 мл различ-

ных растворов. Применялись следующие растворы: хлористый натрий, сернокислый кальций, хлористый магний с концентрациями такими же, как и в предыдущей серии опытов, воды из скважин 2256, 248, дистиллированная вода. Бутылки герметизировались и хранились при комнатной температуре. Через 1, 2, 3, 7, 30, 120 суток производился химический анализ растворов. Для анализа отбиралось минимально возможное количество раствора. Перед анализом растворы перемешивались. Отмечены следующие изменения в исследуемых растворах.

Дистиллированная вода. В растворе определены щелочь, кремнезем, оксалат-ион, содержание которых увеличивается во времени (рис. 3.13а). Насыщение раствора оксалат-ионом и гидроксильной группой произошло на седьмые сутки. Насыщение раствора кремнеземом происходит значительно медленнее. Видимых изменений в растворе и геле нет.

Раствор NaCl. Насыщение раствора происходит практически так же в опыте с дистиллированной водой (рис. 3.13 б).

Раствор CaSO₄. Наличие иона кальция существенно влияет на процессы, происходящие в растворе. Вскоре после начала опыта в растворе образуются мелкие белые хлопья. Через двое суток объем, занимаемый хлопьями, примерно равен объему исходного геля. Концентрация кальция на вторые сутки падает до 0, после чего в растворе появляется оксалат-ион (рис. 3.14 а). Кремнезем и гидроксильная группа появляются в растворе после некоторого снижения концентрации иона кальция. Верхняя часть геля на глубине 1-2 мм становится более белой.

Концентрированный раствор MgCl₂. В этом опыте силикат и гидроксильная группа в растворе не обнаружены во все сроки. Насыщение раствора оксалат-ионом происходит так же, как в опыте с дистиллированной водой

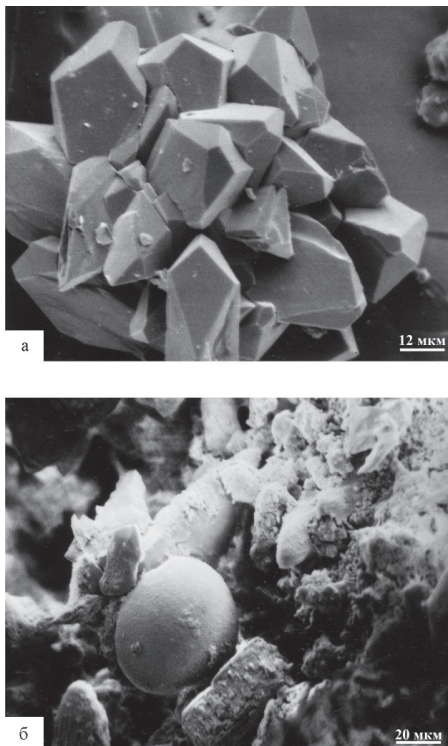


Рис. 3.12. Кристаллы (а) и оолит (б) CaCO₃, выращенные в эпоксидной смоле

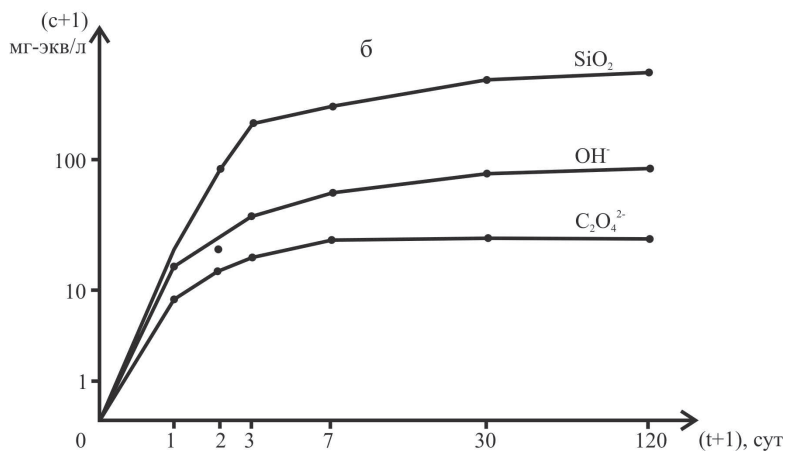
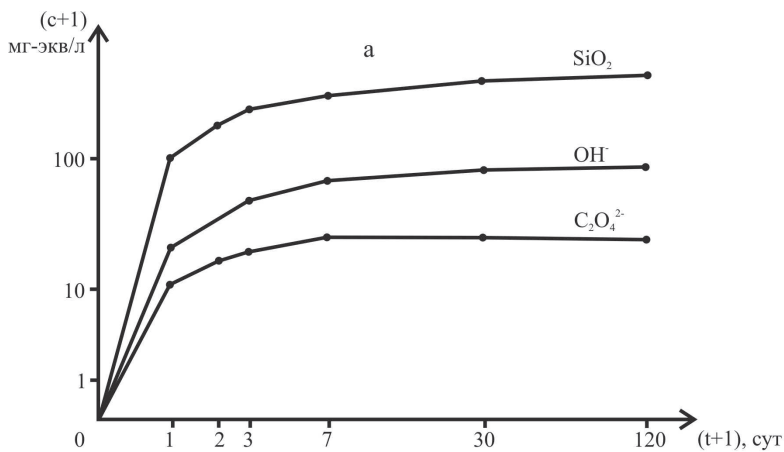


Рис. 3.13. Изменение концентрации компонентов при контакте с гелем:
а — в дистиллированной воде, б — в растворе хлористого натрия

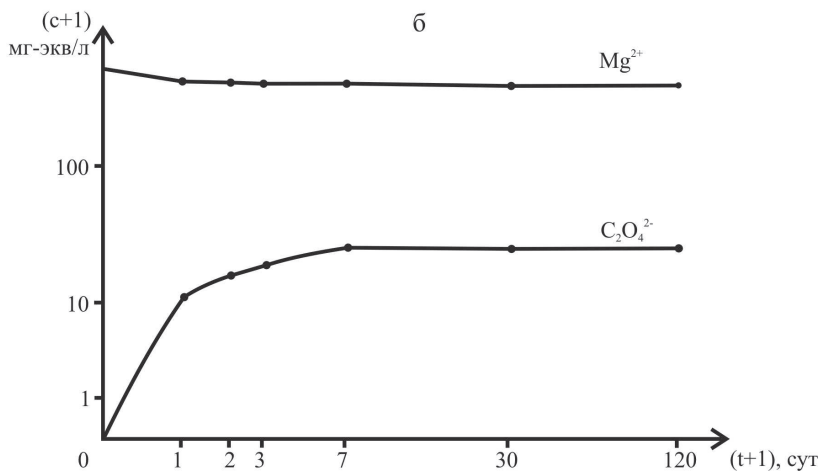
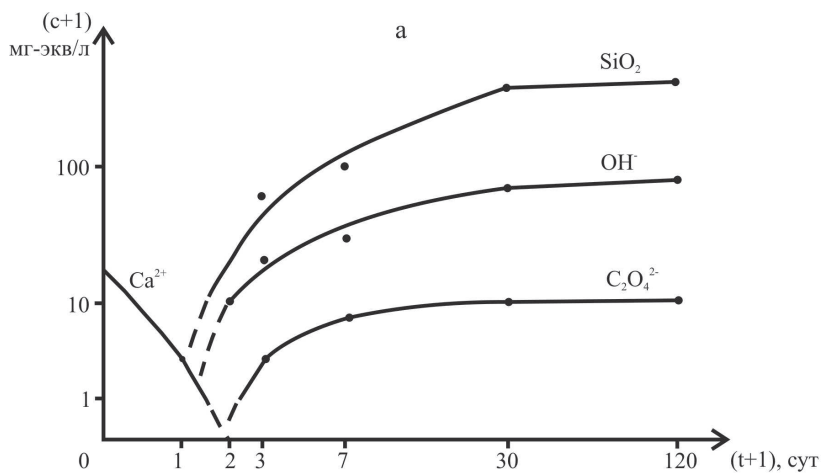


Рис. 3.14. Изменение концентрации компонентов при контакте с гелем: а – в растворе сернокислого кальция, б – в растворе хлористого магния

(рис. 3.14 б). Концентрация иона магния в растворе уменьшилась с 525 до 422 мг-экв/л на 120-е сутки. Через сутки после начала опыта верхняя часть геля приобрела более белый цвет на глубину 0,8 мм. Через 7 суток – на глубину 1,5 см, через 120 суток – по всему объему геля. Раствор прозрачный, без хлопьев.

Вода из скв. 225 б. В растворе произошло выпадение хлопьевидного осадка так же, как в опыте с раствором сернокислого кальция, но в несколько большем количестве. Наблюдается постепенное снижение в растворе концентрации ионов кальция и магния и полное их отсутствие на 7-е сутки, после чего в растворе появляется оксалат-ион (рис. 3.15 а). Выход в раствор кремнезема и щелочи в присутствии кальция и магния существенно замедлен. Верхний слой геля толщиной 1 мм более белый.

Вода из скв. 248. В целом картина аналогична опыту с водой из скв. 225б (рис. 3.15 б). Особенностью является буроватый цвет выпавших в осадок хлопьев геля, что связано с наличием в воде ионов железа.

Анализ химического состава скелета гелей, выполненный на рентгеновском спектрометре, показал, что часть кальция и магния из раствора переходит в твердую фазу гелей. Большое количество этих элементов содержится в хлопьевидном осадке, формирующемся при избытке кальция и магния в растворе (табл. 3.7).

Таблица 3.7. Химический состав твердой фазы гелей

Контактирующий раствор	Минерализация раствора, г/л	Характеристика геля	Химический состав, %			
			Na ₂ O	MgO	CaO	SiO ₂
-	-	исходный гель	7,3	0,4	0,2	64,0
NaCl	9,1	гель	7,5	0,4	0,2	70,0
CaSO ₄	1,2	хлопья в растворе	7,3	0,6	13,1	30,6
MgCl ₂	25,0	гель	4,0	7,1	0,1	71,0
Вода из скв. 225б	2,5	гель	7,6	0,5	0,5	71,5
		хлопья в растворе	5,7	2,3	7,8	50,0
Вода из скв. 248	5,5	гель	6,7	0,5	1,0	76,6
		хлопья в растворе	5,8	3,4	13,0	51,2

Рентгенометрическое изучение гелей и хлопьев показало, что они рентгеноаморфны.

Для получения представления об общем количестве компонентов жидкой фазы геля, которые могут перейти в раствор, и о характере гелеобразования в растворе, движущемся по поверхности геля, была изготовлена специальная установка (рис. 3.16). В лоток, разделенный на секции размером 2,3х0,5х3,2 см, заливался ЩАС-золь. После гелеобразования в лоток из сосуда Мариотта поступал раствор, расход которого был постоянным. Весь раствор, стекающий из лотка, собирался и анализировался, а затем подсчитывалось суммарное количество компонентов, перешедшее в раствор

из геля за время опыта. Опыт продолжался до тех пор, пока состав выходящего раствора не становился одинаковым с исходным. Скорость движения раствора в лотке составляла 4,5 м/сут, что сопоставимо со скоростями движения подземных вод через остаточные трещины в завесе.

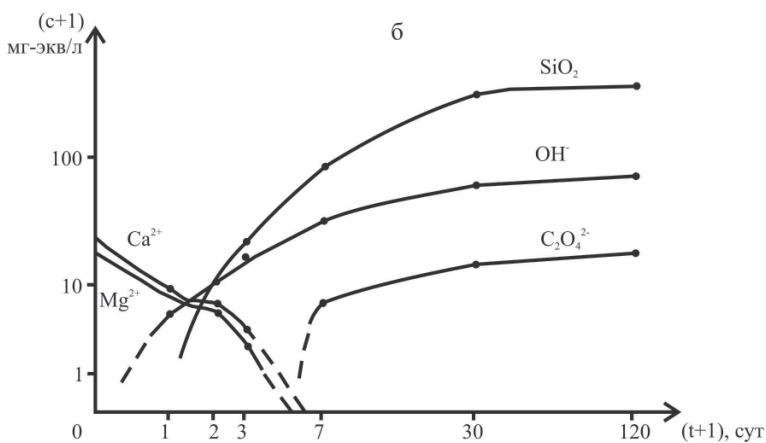
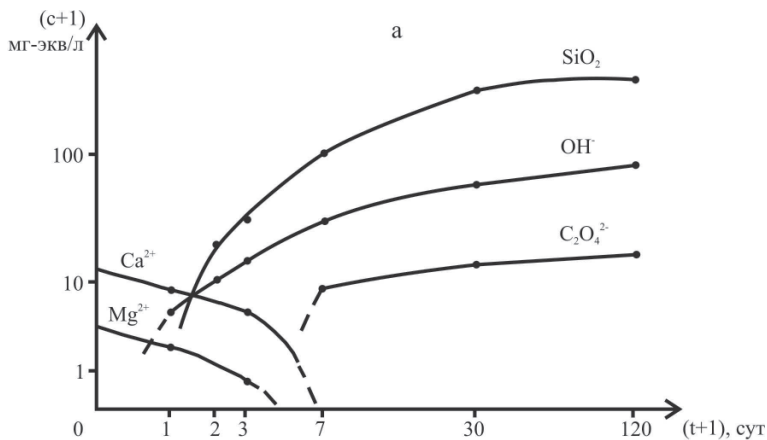


Рис. 3.15. Изменение концентрации компонентов при контакте с гелем:
а – в воде из скв.225б, б – в воде из скв. 248

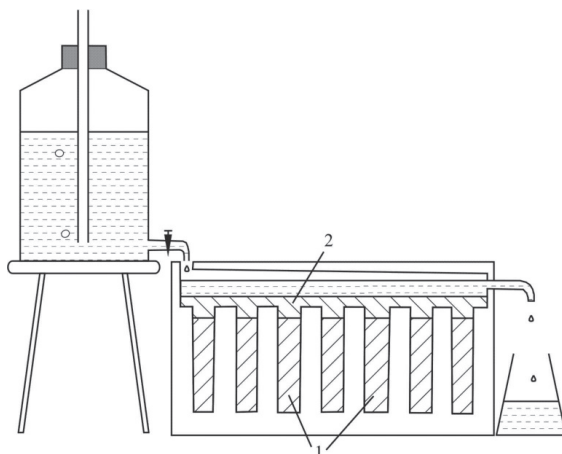


Рис. 3.16. Схема фильтрационной установки для изучения диффузионного выхода компонентов жидкой фазы геля в раствор: 1 – исходный гель; 2 – гель, образовавшийся в растворе

Опыты проводились с дистиллированной водой (№ 1) и растворами сернокислого кальция с концентрацией 1,1 г/л (№ 2) и 1,4 г/л (№ 3). Суммарное количество компонентов интермицеллярной жидкости, перешедшее в растворы сернокислого кальция, в несколько раз ниже, чем в дистиллированную воду (табл. 3.8). Во время опыта в растворе отмечалось некоторое снижение концентрации кальция.

Таблица 3.8. Суммарный выход в раствор компонентов ЩАС-геля

№ опыта	Раствор	Концентрация, г/л	Время опыта, сут	Перешло в раствор, % к общему количеству в геле		
				SiO ₂	ОН ⁻	C ₂ O ₄ ²⁻
1	Дистиллированная вода	0	74	70.9	88.0	99.8
2	CaSO ₄	1.1	43	27.0	16.6	3.0
3	CaSO ₄	1.4	37	13.6	6.9	2.5

В опыте 3 в растворе на поверхности геля первоначально образовались хлопья, а затем – объемный гель. В конце опыта новый гель представлял собой корку, прочность которой значительно выше, чем у исходного геля. В образовавшемся геле по данным рентгенографического исследования определен оксалат кальция CaC₂O₄·2,25 H₂O по линиям с d= (6,18, 4,41,

$2,77 \cdot 10^{-10}$ м. В опыте 2 гелеобразование в растворе шло интенсивнее. Новый гель заполнил верхние части секций и образовал сплошной покров (рис. 3.16). Образующаяся новая твердая фаза не сносится потоком. Проведенные опыты дают представление о количестве диффундирующих компонентов в раствор сернокислого кальция. Диффузионный вынос щелочи, кремнезема, оксалат-иона в такие растворы существенно ограничен.

Результаты исследования показали, что при взаимодействии ЩАС-геля с растворами электролитов существенно изменяются состав и структура гелей и контактирующих растворов. Эти изменения вызваны рядом химических и физико-химических процессов, которые можно свести к следующим: 1) диффузия компонентов жидкой фазы геля в раствор и их осаждение; 2) физико-химические процессы внутри геля; 3) рост кристаллов в геле.

Диффузия и осаждение компонентов жидкой фазы геля в растворе. В растворах, содержащих ионы кальция и магния, происходит осаждение диффундирующего из геля кремнезема в виде хлопьев, обогащенных кальцием и магнием. Форма выпадения осадка зависит от соотношения компонентов в растворе [32, 59]. Процесс диффузии компонентов жидкой фазы геля в растворы солей натрия в области изученных концентраций мало отличается от диффузии их в дистиллированную воду. В этих растворах кремнезем не осаждается. В концентрированные растворы солей магния и кальция, а также в высокоминерализованные подземные воды диффузии щелочи и кремнезема не происходит, так как эти компоненты осаждаются внутри геля. В растворы, содержащие кальций и магний в меньшем количестве, диффузия кремнезема и щелочи существенно ограничена, так как они частично связываются внутри геля. По этой же причине ограничена диффузия оксалат-иона при наличии в растворе ионов кальция.

Присутствие в растворе ионов железа также вызывает осаждение кремнезема. При этом гели гидроокиси железа и кремнезема могут выпадать раздельно или одновременно, образуя железистые силикаты в виде чередующихся слоев, что и наблюдалось в опытах с растворами солей железа и водой из скважины 248. Таким образом, миграция компонентов жидкой фазы геля — кремнезема, щелочи, оксалат-иона — при наличии в контактирующем растворе ионов кальция и магния существенно меньше, чем при контакте геля с дистиллированной водой.

При больших концентрациях кальция и магния диффузии не происходит вообще. Диффундирующий кремнезем в значительной степени осаждается в растворе в виде гелей, в состав которых входит кальций, магний (до 16 %), т.е. в образовании твердой фазы участвуют ионы раствора.

Физико-химические процессы, ведущие к преобразованию структуры геля. Структурные преобразования в геле могут происходить самопроизвольно в процессе его старения. В опыте с дистиллированной водой процесс пе-

реконденсации, усиленный частичным оттоком кремнезема в раствор, привел к укрупнению пор и структурных элементов геля, что хорошо прослеживается при сравнении его структуры со структурой свежеприготовленного геля (рис. 3.6 а, б). При диффузии в гель катионов кальция и магния происходят процессы, ведущие к изменению гелей в результате образования твердой фазы: хемосорбция катионов на поверхности скелета геля и частичная коагуляция кремнезема интермицеллярной жидкости. Хемосорбция ведет к образованию труднорастворимых силикатов этих металлов, что вызывает не только уплотнение геля, но и может препятствовать процессу перекоонденсации, повышает его химическую устойчивость. Характер новообразований на поверхности скелета гелей, контактировавших с раствором сернокислого кальция и водой из скв. 248 и 225 б, отражен на рис. 3.8 б, в, г.

На рис. 3.8 а для сравнения дана поверхность структурного элемента геля в опыте с дистиллированной водой.

Другой причиной уплотнения структуры геля является коагуляция силиката интермицеллярной жидкости геля диффундирующими из раствора в гель электролитами. Подобные процессы отмечались И. Б. Слиняковой и И. Е. Неймарком [143] при промывании геля кислотой. Состав формирующегося геля зависит от состава коагулянта. В опытах с растворами, содержащими ионы кальция и магния, по-видимому, будет происходить образование кальций-магний-силикатных гелей. Вторичное гелеобразование может быть также связано с тем, что скорость диффузии ионов OH^- больше, чем у более крупных частиц кремнезема [174]. Разница в скорости диффузии вызывает рост силикатного модуля интермицеллярной жидкости, что может привести к ее гелеобразованию внутри геля. Очевидно, этот процесс будет развиваться активнее при уплотнении геля, затрудняющем диффузию крупных частиц силиката в раствор.

Хемосорбция ионов кальция и магния гелем и коагуляция интермицеллярной жидкости приводит к уплотнению структуры гелей и повышению их прочности, однако пока не ясно, какую роль играет каждый из указанных процессов.

Рост кристаллов в гелях. Проведенные опыты подтвердили предположение о том, что в ЩАС-геле при контакте его с растворами, содержащими катионы кальция и магния, образуются кристаллы. Принципиально методика проведения опытов в определенной степени соответствует условиям, существующим в системе гели — подземные воды, и, следовательно, можно ожидать рост кристаллов в теле завесы.

Растворимость соединений, ионы которых в результате диффузии основных компонентов подземных вод основания Камской ГЭС могут одновременно находиться в интермицеллярной жидкости ЩАС-геля, приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9. Растворимость в нормальных условиях соединений в г/л, которые могут образоваться в ЩАС-геле при контакте с подземными водами [57]

Катионы	Анионы		
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	C ₂ O ₄ ²⁻
Na	359	192	37
Mg	-	351	0.5
Ca	-	2.0	0.006

Из таблицы следует, что в гелях оксалат-ион в первую очередь будет связываться кальцием, а при его отсутствии — магнием. При больших концентрациях кальция после образования оксалата кальция возможен рост кристаллов гипса, что наблюдалось в опыте с концентрированным раствором хлористого кальция. Формирующиеся кристаллы оксалата кальция являются чрезвычайно устойчивыми к растворению соединениями [182].

В отличие от кристаллов образование в гелях оолитов, которое наблюдалось в наших опытах, отмечается редко. Риккетсом [194] получены оолиты арагонита в опытах с силикатными гелями, проведенные по схожей схеме, однако причины этого явления он не указывает. По мнению Твенхофела [153], в природных условиях диффузия может привести к образованию конкреций в любой осадочной породе, например в глине. Возможно, рост оолитов в проведенных опытах связан с высокой плотностью гелей.

Рост кристаллов и оолитов приводит к уплотнению ЩАС-геля, причем дополнительная твердая фаза образуется из компонентов отвердителя, не участвующих в построении твердой фазы геля, и компонентов контактирующего раствора. Гель при этом остается сплошным.

Проведенные исследования показали следующее:

1. При взаимодействии ЩАС-геля с растворами электролитов активно протекают химические и физико-химические процессы. Эти процессы в результате гелеобразующего действия электролитов, в которых главную роль играют ионы кальция и магния, увеличивают степень мобилизации кремневой кислоты — одного из основных показателей эффективности силикатизации. Дополнительная твердая фаза образуется также и при взаимодействии оксалат-иона — компонента отвердителя ЩАС-раствора, не участвующего в гелеобразовании, с катионами кальция и магния подземных вод. Указанные компоненты осаждаются как внутри геля, так и в контактирующем растворе. Таким образом, ЩАС-гель в теле завесы является самоуплотняющимся во времени за счет внешних факторов. Кроме того, что увеличивается плотность и прочность геля, он становится химически более устойчивым. Рост труднорастворимых кристаллов, соизмеримых по

величине с шириной раскрытия инъецируемых трещин, позволяет говорить об их своеобразной цементации.

2. При наличии в растворе ионов кальция и магния диффузия из геля кремнезема, щелочи и оксалат-иона существенно ограничена, а диффундирующие компоненты осаждаются в растворе, что можно рассматривать как расширение зоны, где происходит тампонирующее пород.

3. При разработке рецептур для тампонирующего тонкотрещиноватых пород следует учитывать возможность подбора такого отвердителя, у которого компоненты, формирующие интермицеллярную жидкость геля, вступали бы в реакцию с ионами подземных вод, и образовывали бы кристаллы в гелях.

3.5. Формирование техногенных вод на участке завесы

При рассмотрении вопроса о возможности доуплотнения противодиффузионной завесы в основании Камской ГЭС ЩАС-раствором высказывались предположения, что в закреплённом массиве будут формироваться и длительное время существовать щелочные силикатсодержащие растворы [135], которые могут привести к растворению гипса [149]. Рассмотрим изменения химического состава подземных вод, произошедшие вследствие доуплотнения противодиффузионной завесы под влиянием постинъекционных процессов.

Для контроля за растворением гипсоносных пород на ГЭС создана обширная пьезометрическая сеть, с помощью которой ведутся режимные гидрохимические наблюдения. В цементационной потере расположены пьезометры, пройденные под углом в обе стороны к плоскости противодиффузионной завесы. Эти пьезометры, находящиеся непосредственно в зоне ведения инъекционных работ, дают возможность проследить изменение химического состава подземных вод. Химические анализы показали, что в водах вскоре после окончания инъекции такие техногенные компоненты, как силикат и оксалат натрия, отсутствуют.

Данные многолетних наблюдений позволили установить некоторые изменения химического состава подземных вод, произошедшие вследствие различных постинъекционных процессов. Высокие значения рН инъекционного раствора (около 11,2) оказывают влияние на водородный показатель подземных вод. В период перед инъекцией воды характеризовались средними значениями рН от 3,3 до 9,1 при преобладании слабощелочных вод (табл. 3.10).

Значительное возрастание значений рН наблюдается только непосредственно после проведения инъекции. Например, в пьезометре 256, расположенном перед завесой, значения рН возросли с 7,7 до 9,3, в пьезометре 124, расположенном после завесы, - с 7,5 до 10,5.

Таблица 3.10. Средние значения водородного показателя подземных вод в периоды до и после инъекции

Водоносный горизонт		Шешминский					Верхнесоликамский							
Расположение пьезометра		перед завесой	за завесой					перед завесой	за завесой					
№ пьезометра		259	111	124	147	182	256	262	112	125	183	189	260	
Среднее значение рН	до инъекции	7,5	7,4	7,6	8,3	7,9	7,7	7,5	7,6	6,9	9,1	7,5	3,3	
	после инъекции	7,4	7,6	7,9	7,8	7,7	7,8	7,6	7,6	7,4	7,5	7,2	7,4	

Через 2-3 года после инъекции средние значения водородного показателя вод во всех пьезометрах, находящихся за завесой, колебались в пределах 7,2-7,9, т.е. кислые воды сменились на слабощелочные, и в то же время произошло снижение щелочности вод, имевших значения водородного показателя больше 8,0. Следует отметить, что после создания завесы разброс значений рН по годам уменьшился.

Непосредственно после завершения инъекции в подземных водах наблюдалось снижение концентрации кальция и магния (рис. 3.17, 3.18). Этот эффект проявляется как для вод шешминского водоносного горизонта с низкой минерализацией (рис. 3.17), так и для более высокоминерализованных вод верхнесоликамского горизонта. Снижение концентрации магния происходит интенсивнее, чем кальция. В пьезометре 125 (рис. 3.18) проба воды отобрана вскоре после проведения инъекции на данном участке, что подтверждает тот факт, что снижение концентрации этих компонентов связано с внедрением раствора. Определенный интерес представляют данные пьезометра № 161, который находился в районе проведения опытных работ в 1974 г. После инъекции в подземных водах кальция и магния не обнаружено. В последующие годы отмечено появление этих ионов и увеличение их концентрации. После проведения производственных инъекционных работ на этом же участке концентрация кальция и магния снова уменьшилась. Уменьшение концентрации двухвалентных катионов после инъекции сменяется постепенным возрастанием во времени. Для натрия и анионов, входящих в состав подземных вод, определенной зависимости не прослеживается.

Рассмотрим причины отсутствия техногенных компонентов — кремнезема, щелочи, оксалат-иона в подземных водах района завесы. По имеющимся представлениям кремнезем в водах с минерализацией более 0,1 г/л неустойчив и не может существовать в растворенном состоянии. На рис. 3.19 показана общая зависимость содержания кремнезема в сухом остатке природных вод от их минерализации [21] и приведены гистограммы распределения минерализации вод шешминского и верхнесоликамского водонос-

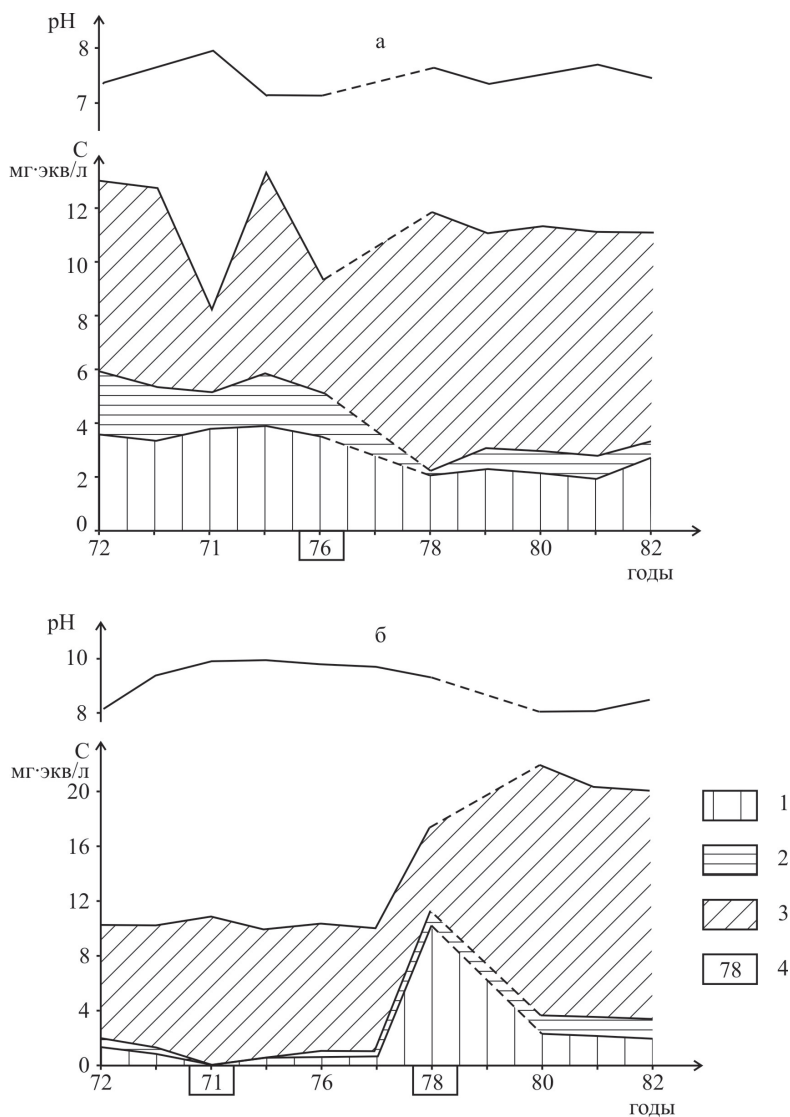


Рис. 3.17. Изменение катионного состава и pH подземных вод шешминского водоносного горизонта после инъекции ЩАС-раствора по данным пьезометров: а – 111; б – 161; концентрация (с) катионов в воде (мг · экв/л): 1 – кальций; 2 – магний; 3 – натрий; 4 – год проведения инъекции

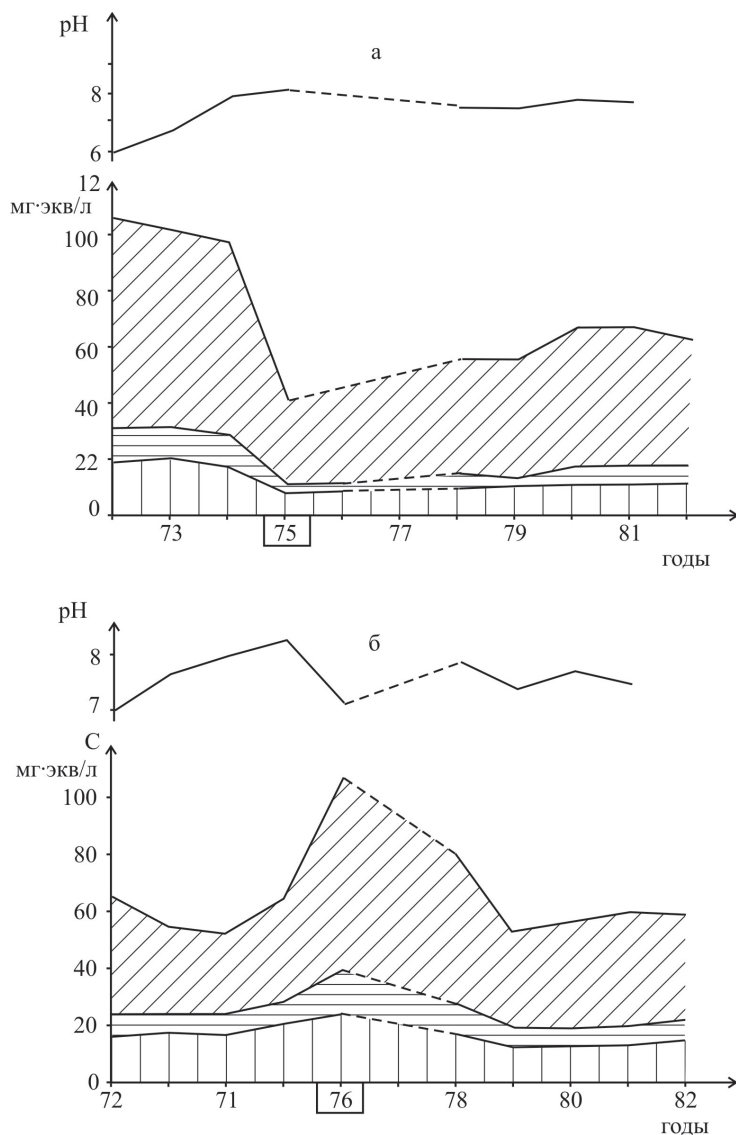


Рис. 3.18. Изменение катионного состава и pH подземных вод верхнесоликамского водоносного горизонта после инъекции ЩАС-раствора по данным пьезометров: а – 125; б – 112 (остальные обозначения те же, что на рис. 3.17)

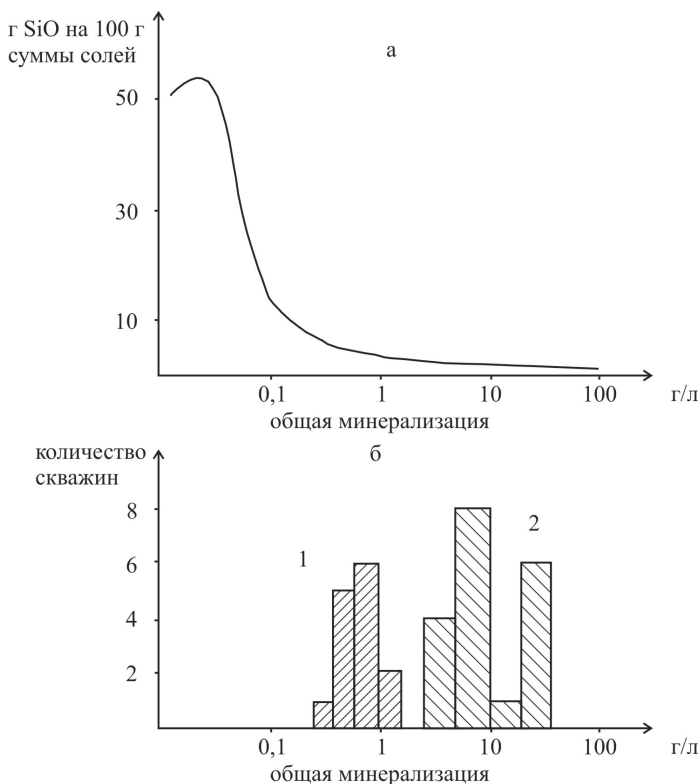


Рис. 3.19. Зависимость содержания кремнезема в природных водах от их минерализации [21] (а) и гистограммы распределения минерализации вод шешминского (1) и верхнесоликамского (2) водоносных горизонтов в районе завесы (1974 г.) (б)

ных горизонтов в районе противофильтрационной завесы в 1974 г. Из рисунка следует, что кремнезем не может играть существенной роли в формировании химического состава подземных вод основания Камской ГЭС.

Как отмечалось выше, техногенные компоненты могут попадать в подземные воды в результате двух процессов: гидродинамической дисперсии инъекционного раствора и диффузии из интермицеллярного пространства геля. Лабораторные исследования процессов, происходящих в зоне разбавления инъекционного раствора, показывают, что при смешивании ЩАС-золя и подземных вод происходит осаждение указанных техногенных компонентов. Область их совместного существования характеризуется низкими значениями концентрации как кремнезема, щелочи, оксалат-иона, так и

их осадителей - ионов кальция и магния. По сути сходные результаты были получены Б. А. Ржаницыным [126] при последовательном пропускании через трубу с песком растворов жидкого стекла и хлористого кальция. В незакрепившейся части грунта выделена зона, где в поровом растворе существует только хлористый кальций, за ней следует зона с неотвержденным силикатом натрия. Область, где существуют оба эти компонента, отсутствует. В. П. Ананьев, Л. П. Шувалова и др. [6] также отмечали, что сразу после закрепления силикатным раствором снижается до нуля концентрации кальция и магния в поровом растворе лёссовидных суглинков. Через 14 суток в растворе появился кальций, концентрация которого возрастала со временем. Магний в составе поровых вод не был обнаружен.

Отсутствие оксалат-иона в водах основания Камской ГЭС объясняется тем, что он, присутствуя даже в незначительных концентрациях, связывается кальцием. В указанных процессах ионы кальция и магния частично переходят в твердую фазу, в связи с чем отмечается некоторое снижение их концентрации в подземных водах.

Таким образом, в формирующейся зоне разбавления ЩАС-раствора активно протекают химические и физико-химические процессы. В результате взаимодействия с подземными водами в зоне разбавления образуется дополнительное количество геля, что увеличивает тампонажный эффект исследованного раствора. Состав и структура этого геля в существенной мере контролируются ионами кальция и магния подземных вод, входящими в его скелет. При больших разбавлениях ЩАС-раствора образование геля кремнезема не наблюдается, и в связи с этим часть компонентов раствора распространяется за пределы завесы; повышение выхода щелочи за счет гидролиза силиката натрия при разбавлении приводит к некоторому увеличению значений рН в районе завесы в начале постинъекционной стадии. Активное осаждение техногенных компонентов подземными водами обуславливает их и относительно короткое время существования в растворенном состоянии.

Установлено, что диффузионный вынос техногенных компонентов из геля в минерализованные воды существенно не развивается. Это вызвано, во-первых, тем, что происходит диффузия в гель ионов кальция и магния, вследствие чего значительная часть силиката натрия и оксалат-ионов осаждается внутри геля. Во-вторых, диффундирующие в раствор кремнезем, щелочь и оксалат-ион, как отмечалось выше, неустойчивы в минерализованных водах. Они осаждаются на поверхности геля и в растворе, усиливая тем самым тампонажный эффект. Данные выводы, сделанные на основании лабораторных исследований, подтверждаются натурными гидрохимическими наблюдениями, которые показали отсутствие в подземных водах указанных компонентов на постинъекционной стадии. Медленным протеканием процессов осаждения внутри геля, которые идут с поглощением

ионов кальция и магния и ограничены скоростями диффузии в геле, можно объяснить постепенное, длящееся несколько лет восстановление снизившейся после инъекции концентрации этих ионов в подземных водах в районе завесы (рис. 3.17; 3.18).

Таким образом, основываясь на закономерностях распространения кремнезема в природных водах, а также на результатах проведенных лабораторных исследований и данных натурных наблюдений за химическим составом подземных вод района противофильтрационной завесы, можно заключить, что компоненты ЩАС-раствора — кремнезем, щелочь, оксалат-ион — неустойчивы в условиях минерализованных вод основания Камской ГЭС, вследствие чего быстро осаждаются и играют ограниченную роль в формировании их химического состава. Эти компоненты в низких концентрациях могут короткое время существовать в подземных водах в непосредственной близости от завесы.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОСТИНЪЕКЦИОННЫХ РАСТВОРОВ С ГИПСОМ

4.1. Гипсоносные породы как основания плотин

Одним из неблагоприятных инженерно-геологических условий строительства гидротехнических сооружений является наличие в их основании гипса. На территории СССР суммарная площадь пород, содержащих гипс, составляет 5 млн. км² [43]. Возведение водоподпорных сооружений может привести к изменению гидродинамического режима, появлению в массиве вод, не насыщенных сульфатом кальция. Это создает условия для развития или интенсификации карста, что ставит под угрозу существование плотин. Активизация карста может быть также связана с увеличением трещиноватости вследствие фильтрационных деформаций, выветривания пород в процессе строительства [106]. Определенную роль играет увеличение растворимости пород под действием нагрузки от сооружения [112].

К настоящему времени накоплен опыт, обобщенный в работах Г. С. Золотарева, А. Г. Лыкошина, Л. А. Молокова, И. А. Парабучева и др. [50, 69, 75, 95, 106, 189] и успешно ведется строительство плотин с карстующимися карбонатными породами в основании. Плотин, содержащих в основании гипс и каменную соль, значительно меньше. При наличии в основании гипса, имеющего большую растворимость по сравнению с карбонатами, в ряде случаев отказывались от сооружения плотин. Например, в Провансе (Франция) в процессе строительства плотины на окраине горного массива Сен-Бом были обнаружены гипсоносные мергели, и стройка была остановлена. Прекращены изыскания для плотины Риан около г. Бриньоля

(Франция) и плотины Альтер-Штольберг около г. Гарца (Австрия), в основании которых обнаружены гипсы [38, 60, 95]. Остановлено строительство небольшой ГЭС на р. Ирень в Пермском крае [96]. В Ираке одной из причин отказа от выгодного створа Фатха послужило наличие в породах до 60 % гипса и ангидрита [173].

В ряде случаев строительство плотин на гипсоносных породах приводило к катастрофам и авариям. Одной из причин разрушения плотины Сент-Френсис (Калифорния, США) высотой 63 м явилось растворение гипса, содержащегося в конгломератах основания. В результате катастрофы погибло 400 человек [36, 123, 155]. Известны катастрофические случаи на плотинах Куаил Крик и Титон (США). В окрестностях Базеля на р. Бирс растворение пластов гипса в основании плотины привело к ее растрескиванию и оседанию [38, 60]. Потери воды из водохранилищ при небольших плотинах с гипсоносными породами в основании происходили на р. Осе в бассейне р. Ангары [22], в США – штатах Оклахома и Нью-Мексико [177]. Осадки наблюдались на плотинах Сан-Фернандо, Драй Каньон, Буэно Виста, Кастейк, Олив-Хиллс, Рэтлснейк в Калифорнии (США), а также на Сентфордской плотине (Техас, США). В США полости, образовавшиеся вследствие растворения гипса, обнаружены в основаниях плотин Хондо, Максимилян, Авалон (Нью-Мексико) и Редрок (Айова), а также на плотине Фонтанелле (Оклахома) [184].

Аварийная ситуация возникала на Тбилисской бетонной плотине, отделяющей водохранилище от оврага. Основание плотины сложено песчаниками, аргиллитами, алевролитами, содержащими до 21 % гипса. Противофильтрационные мероприятия на этой плотине предусмотрены не были. После года эксплуатации вследствие выщелачивания гипса прочность пород основания снизилась, в плотине появились трещины, произошло смещение блоков. После создания цементационной завесы указанные явления были ликвидированы.

Проблема защиты гипса от растворения возникала при создании Ереванской ГЭС на р. Раздан, Байпазинской ГЭС на р. Вахш, плотин Брентли, Мозес Сандерс Тауэ (США), Эль Изиро (Венесуэла), Аллоз (Испания), Пебль де Пава (Гватемала), Хуошипо (Китай), Каза де Пиедра (Аргентина), Хесигхейм на р. Неккар (Германия), Монт Сенис (Франция) [12, 95, 176]. Такие же проблемы возникли на существующих и проектируемых плотинах в Ираке: Докан, Дербенди-Хан, Рава, Хит, Мосул, Тартар, Хадита и др. [173, 178]. Гипсы залегают в основании плотин Сен-Лоран в Каталонии, Жела на Сицилии, Позкос в Перу [60, 74, 185]. Необходимость проведения надежных противофильтрационных мероприятий для защиты гипса от растворения возникла на Ирганайской, Нижне-Каферниганской, Рогунской, Сангтудинской плотинах.

Основной целью мероприятий на Камской ГЭС является предупреждение растворения гипса. При оценке эффективности этих мероприятий необходимо учитывать воздействие постинъекционных процессов на химическую устойчивость гипса. В связи со сказанным исследования были направлены на уточнение физико-химических особенностей взаимодействия гипса с постинъекционными растворами и оценку влияния применения ШАС-раствора на химическую устойчивость гипса.

4.2. Особенности взаимодействия гипса с растворами электролитов

Гипс относится к минералам с преобладанием ионного типа связей (простые соли) и характеризуется слабой устойчивостью в воде и высокой химической активностью [139]. Молекулярная структура гипса слоистая: слои ионов кальция и сульфат-групп разделяются молекулами воды [43, 141]. В результате трехмерного рентгенографического исследования установлено, что молекулы воды образуют двойные слои, причем один из атомов водорода оказывается на внешней поверхности слоя, а другой — на внутренней, поэтому степень их участия в образовании водородных связей различная [180]. Гипс кристаллизуется в моноклиальной сингонии. Кристаллы гипса имеют таблитчатый облик, реже столбчатый или призматический, часто образуют двойники сростания. Порода гипс, сложенная одноименным минералом, имеет различную структуру: от микро- до грубозернистой. Для гипса характерна большая изменчивость структурных характеристик: микропористости, морфологии, ориентации кристаллов [119].

Энергия кристаллической решетки гипса невелика – 650 ккал/моль, что обуславливает его высокую с геологической точки зрения растворимость – 2,01 г/л при температуре 18°C. Скорость растворения гипса определяется процессом диффузии, константа скорости растворения эквивалентна величине коэффициента диффузии $4 \cdot 10^{-6}$ см/с [179]. Растворимость гипса снижается при наличии в растворе ионов, одноименных с твердой фазой, например, солей сернокислого магния и хлористого кальция [92, 172]. В растворе сернокислого натрия при увеличении концентрации растворимость гипса сначала снижается, а затем увеличивается до 2,6 г/л [43]. В растворах солей, не имеющих одноименных ионов с гипсом (например, в растворах хлористого натрия и магния, азотнокислых солей этих металлов), растворимость гипса возрастает и может в несколько раз превышать его растворимость в дистиллированной воде [43, 92, 172]. В растворах, представляющих смеси различных солей, растворимость гипса изменяется по более сложным закономерностям, которые исследованы в работах В. П. Зверева [64], А. А. Понизовского, Я. А. Пачепского [122] и др.

Ряд работ посвящен исследованию растворения гипса движущимся растворителем. Для проведения экспериментов применялись различные схемы. В опытах Ф. Ф. Лаптева [89] растворитель фильтровался через трубы, заполненные крошкой гипса. А. М. Кузнецов [84], Д. П. Прочухан [124], Н. Н. Маслов и В. Г. Науменко [101] проводили опыты по фильтрации через щели с плоскопараллельными стенками; Джеймс и Лаптон [184] — через круглоцилиндрические каналы в гипсе. Установлено, что скорость растворения гипса возрастает с увеличением скорости движения растворителя и снижается по мере насыщения раствора в процессе движения [120]. Отмечается, что щели и каналы имеют после фильтрации клиновидную форму с расширенной частью в месте поступления раствора.

А. А. Турцев [158] изучал растворение загипсованных пород основания Камской ГЭС - известняков, доломитов и мергелей путем фильтрации под давлением дистиллированной воды и природных вод через поровое пространство этих пород. Им установлено, что при длительности опытов около двух месяцев признаки растворения обнаруживаются только в тонком пограничном слое породы толщиной не более 0,3 мм.

При наличии в растворе веществ, реагирующих с гипсом, химические реакции могут идти как с образованием, так и без образования новой твердой фазы. В последнем случае процесс растворения ускоряется, так как в результате реакции возрастают градиенты концентраций сульфата кальция в диффузионном слое [4]. Растворимость гипса зависит от концентрации реагента в растворе. Например, при воздействии на гипс соляной кислоты его растворимость при увеличении концентрации кислоты от 0 до 8 % увеличивается до 1,83 %, а затем падает [87].

При химическом взаимодействии раствора, идущего с образованием твердой фазы, выделяют три типа реакций [4]: 1) реакции, в которых образующаяся твердая фаза удаляется с поверхности растворения (например, движущимся раствором); скорость реакции в этом случае не меняется; 2) твердая фаза образуется в растворе, что обуславливается его пересыщением. Поверхность растворяющего вещества может экранироваться в случае оседания на ней образующейся твердой фазы; 3) твердые продукты реакции образуют на поверхности пленку, связанную с исходным твердым материалом; толщина пленки увеличивается со временем, скорость процесса падает.

В большинстве случаев, в том числе при взаимодействии гипса и других минералов с растворами, характерны реакции, идущие по третьему типу, поскольку зародышеобразование новой твердой фазы с энергетической точки зрения происходит легче на поверхности минерала, чем в растворе [63]. Такие реакции, носящие название топохимических, обладают рядом особенностей [4, 129]. Для них характерна локализация реакционной зоны на поверхности раздела фаз твердого реагента и твердого продукта реак-

ции, что обусловлено повышенной реакционной способностью твердого реагента в области этой поверхности. Топохимическую реакцию можно представить как последовательность стадий: образование атомов (молекул) твердого продукта на поверхности реагента, возникновение ядер нового продукта, их рост, образование твердого продукта, толщина которого растет во времени и затрудняет дальнейшее протекание реакции, поскольку концентрация реагирующего вещества раствора, поступающего в зону реакции, снижается. Стадийность обуславливает своеобразный характер скорости реакции во времени. В начале ее скорость мала, затем возрастает, переходит через максимум и снижается либо до нуля, либо до значений, отличных от нуля и мало зависящих от времени.

Образование пленки может происходить как с уменьшением, так и с увеличением общего объема твердой фазы. Направленность этого процесса зависит от многих факторов: соотношения молекулярных объемов вещества пленки и минерала, физической структуры пленки, соотношения скоростей растворения минерала и кристаллизации пленки, скорости фильтрации и концентрации раствора, энергетических и структурных особенностей поверхности минерала и др. [4, 52, 145].

Компоненты ЩАС-раствора — кремнезем, щелочь, оксалат натрия реагируют с гипсом, что ведет к образованию на его поверхности твердых продуктов реакции. Ряд исследователей с различными целями изучали взаимодействие гипса с подобными соединениями. Исследованиями А. В. Николаева, Л. Г. Берга и др. [13, 63] установлено, что при воздействии на гипс раствора оксалата аммония на поверхности образуется пленка оксалата кальция, которая уменьшает скорость растворения гипса. С. Д. Воронкевичем, Л. А. Евдокимовой, Н. А. Ларионовой [35] отмечается формирование на поверхности гипса осадка, содержащего оксалат кальция при воздействии на него щелочных силикатных растворов, содержащих оксалат натрия. Образование подобных пленок отмечают и другие исследователи [10]. Гипс активно взаимодействует с растворами гидроокиси натрия, в результате чего на его поверхности образуется гидроокись кальция и происходит торможение реакции [28, 35, 73, 146]. Интенсивность реакции возрастает с увеличением дисперсности гипса [146]. При увеличении концентрации щелочи кинетическая кривая растворения проходит через максимум [73].

Для гипса характерны реакции со щелочными кремнеземсодержащими растворами. При концентрации силикат-иона в растворе не выше 1,5 г/л, по данным И. И. Феофаровой [39], на поверхности гипса образуется тонкодисперсный осадок кремнекислого кальция. В присутствии углекислого газа этот осадок переходит в бикарбонат кальция и гель кремнезема. Опытами В. В. Аскалонова [8] установлено, что при воздействии на пластинки гипса концентрированных растворов силиката натрия на поверхности гипса

образуется пленка кремнезема, толщина которой уменьшается с увеличением концентрации раствора. Изучению воздействия на гипс щелочных кремнеземсодержащих растворов посвящены исследования, проводимые Проблемной лабораторией МГУ [28, 35].

Существует мнение, что взаимодействие гипса с силикатом натрия происходит через промежуточное соединение – гидроокись кальция, которое образуется при воздействии щелочи на гипс. Образующаяся гидроокись кальция, являясь отвердителем силикатного раствора, взаимодействует с ним, в результате чего формируются гидросиликаты кальция [146, 149]. Эти соединения являются вяжущими веществами, поэтому в целом наличие гипса в грунтах, закрепляемых силикатными растворами, многими исследователями расценивается как положительный фактор. Например, для большинства лёссовых грунтов до 20 % гидроокиси кальция, вступающей в реакцию гелеобразования, образуется за счет разложения гипса [149]. Е. В. Степановой [151] доказана возможность закрепления силикатными растворами водонасыщенных дисперсных грунтов с содержанием гипса до 70-80 %. А. В. Манукян и Б. А. Ржаницин [100] показали возможность применения растворов на основе силиката натрия для закрепления белоземов Армении, содержащих до 46 % гипса. Цементные растворы с добавкой силиката натрия применялись для закрепления гипсоносных пород во Франции [193]. В то же время до и после создания завесы в основании Камской ГЭС высказывались предположения, что применение ЩАС-раствора и формирование в массиве щелочных вод может отрицательно сказаться на химической устойчивости гипса [149].

4.3. Взаимодействие гипса с силикатсодержащими растворами

В закрепленном массиве гипс может подвергаться химическому воздействию как постинъекционных растворов, так и геля (рис. 2.1). В разделе 3 было показано, что в первом случае с гипсом будут взаимодействовать растворы, содержащие техногенные компоненты в низких концентрациях. В основе процессов, происходящих при контакте гипса и геля, лежит воздействие на гипс жидкой фазы геля. Для исследования этих процессов изучалось воздействие на гипс как раствора, моделирующего интермицеллярную жидкость геля, так и непосредственно самого геля.

Исследование влияния на химическую устойчивость гипса постинъекционных растворов проводилось в два этапа. На первом этапе изучалась в статических условиях химическая сторона взаимодействия гипса со щелочными кремнеземсодержащими растворами и растворами оксалата натрия. На втором этапе в динамических условиях исследовалось изменение суммарного объема твердой фазы в ходе химических реакций, а также устойчивость новообразований.

Опыты в статических условиях. Из керна скважин, пройденных в цементационной потерне, были отобраны образцы волокнистой разновидности гипса — селенита, которая наиболее распространена в породах основания Камской ГЭС. По литературным данным [64, 128] селенит имеет наибольшую скорость растворения среди всех разновидностей гипса. Образцы селенита по результатам химического анализа и рентгенографических исследований практически не содержат примесей. Как известно, гипс, содержащий нерастворимые примеси, менее растворим, чем чистый. Таким образом, исследования проводились с наименее химически устойчивой разновидностью гипса. Для опытов использовались пришлифованные диски гипса толщиной около 1 см, вырезанные из керна диаметром около 6 см, а также фракция гипса 1-3 мм, применение которой позволяло интенсифицировать процессы за счет увеличения поверхности твердой фазы.

Проведены исследования взаимодействия со следующими растворами.

1. Раствор, соответствующий по составу жидкой фазе геля. Концентрация его компонентов рассчитана по уравнению гелеобразования ЩАС-раствора. После приготовления раствор был отфильтрован от хлопьевидного осадка и имел по данным химического анализа следующий состав (г/л): NaSO_4 — 8,47; $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ — 13,67; NaOH — 27,98; SiO_2 — 43,11; pH — 12,8.
2. Подщелоченный раствор оксалата и сульфата натрия, близкий по составу и pH к жидкой фазе геля, но не содержащий силиката натрия, примененный для выявления роли последнего. Химический состав раствора (г/л): NaSO_4 — 11,72; $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ — 17,15; NaOH — 0,38; pH — 11,6.
3. Раствор, представляющий равновесную с гелем жидкость. Для его приготовления 1,5 л ЩАС-геля заливалось 4 л дистиллированной воды. Химический анализ после насыщения раствора показал следующее (г/л): Na_2SO_4 — 1,92; $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ — 3,35; NaOH — 3,40; SiO_2 — 7,0. Использовались такие же растворы оксалата натрия различной концентрации и дистиллированная вода.

В проводимых опытах диски гипса запарафинированной нижней гранью помещались на дно стакана и заливались 100 мл раствора. В опытах с фракцией 5 г гипса в колбах заливались 50 мл раствора. Такое количество гипса в один слой распределяется по дну колбы емкостью 250 мл. Увеличение количества и уменьшение дисперсности гипса приводит к гелеобразованию в жидкостях, содержащих силикат. Колбы и стаканы герметизировались. Через определенные промежутки времени в течение полугода производился химический анализ раствора. Для каждого срока гипс помещался в отдельную емкость. Изучение взаимодействия гипса с оксалатом натрия проводилось по другой схеме. Гипс в количестве 5 г помещался в

50 мл раствора следующих концентраций (г/л): 37,0 (насыщенный раствор), 27, 75; 18, 50; 9,25, а также в дистиллированную воду. Через 35 суток растворы анализировались. Кальций определялся комплексонометрическим методом, оксалат-ион — титрованием перманганатом калия, щелочь и кремнезем — по методу В. Е. Соколовича [149], сульфат-ион — весовым методом.

Результаты исследований. Система гипс — дистиллированная вода. Насыщение воды сульфатом кальция в условиях опыта происходит довольно быстро. Равновесие в системе фракция гипса — вода практически наступает через 7 суток, в системе пластина гипса — вода наступает между 7 и 30 сутками.

Система гипс — растворы оксалата натрия различной концентрации. Взаимодействие растворов с гипсом продолжалось 35 суток. Такой срок дает наиболее полную картину процессов, происходящих в системах: при малых концентрациях прореагировало все количество оксалата натрия и начался процесс растворения гипса, о котором мы судим по появлению в растворе иона кальция (рис. 4.1). В более концентрированных растворах прореагировала только часть оксалата натрия. Поверхность гранул гипса покрылась белым налетом оксалата кальция.

Система гипс — подщелоченный раствор оксалата и сульфата натрия. Химический анализ растворов показал, что с течением времени происходит уменьшение концентрации оксалат-иона и увеличение концентрации сульфат-иона (рис. 4.2 а). Через 180 суток в растворе не обнаружен оксалат-ион, присутствует кальций, что говорит о начавшемся растворении гипса. До тех пор пока в растворе есть оксалат натрия, в нем отмечаются следы щелочи — раствор окрашивался фенолфталеином. На поверхности гипса

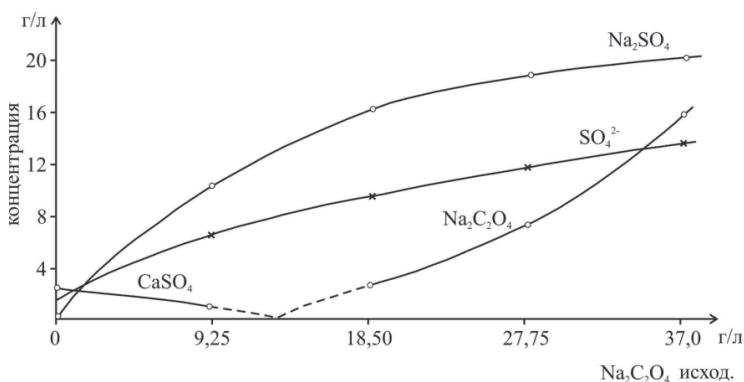


Рис. 4.1. Содержание компонентов в растворах оксалата натрия различной концентрации после взаимодействия с гипсом

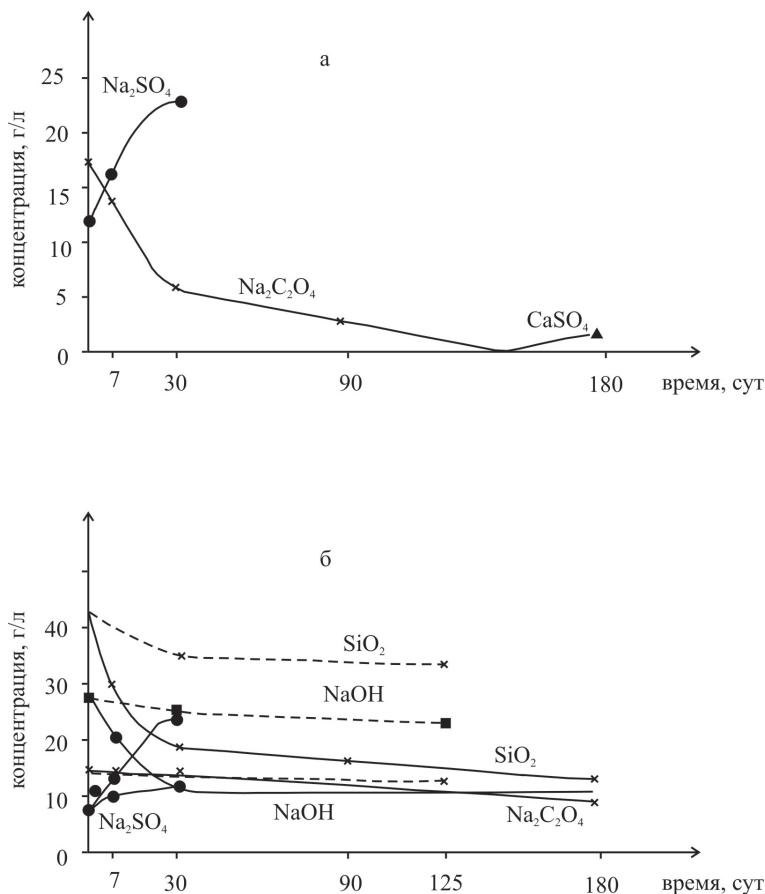


Рис. 4.2. Изменение во времени концентрации компонентов в системах:
 а – фракция гипса – подщелоченный раствор сульфата и оксалата натрия;
 б – гипс-раствор, соответствующий жидкой фазе геля; сплошная линия –
 опыты с фракцией гипса, пунктирная – с пластинками гипса

образовался белый плотный налет. Интенсивность взаимодействия в этой системе резко снижается через 30 суток после начала опыта, что объясняется образованием на поверхности гипса пленки оксалата кальция и уменьшением концентрации оксалата натрия. В опытах с пластинами за месяц прореагировало в 10 раз меньше оксалат-иона, чем в опытах с фракцией гипса. В дальнейшем процесс практически прекратился: за промежуток времени от 30 до 125 суток в реакцию вступило всего 0,06 г/л оксалата натрия.

Система гипс — раствор, соответствующий жидкой фазе геля. Химический анализ раствора показал, что с гипсом наиболее активно взаимодействует силикат натрия и щелочь, в то время как оксалат натрия реагирует значительно медленнее. В опытах с фракцией гипса за 180 суток прореагировало 64 мг-экв/л оксалата натрия, кремнезема — 1996 мг-экв/л и 434 мг-экв/л щелочи (рис. 4.2 б). На поверхности пластины образовался белый с неровной поверхностью осадок толщиной до 4 мм. В опытах с фракцией гипса осадок перекрыл все частицы, вызвав их цементацию. Частицы уменьшились в размерах, рельеф их стал гладким. Рентгенометрическое изучение осадка показало наличие на рентгенограммах линий, характерных для различных гидросиликатов кальция, а также слабых линий оксалатов кальция с $d = (5,75, 4,48, 3,10) \cdot 10^{-10}$ м. Образование осадка затрудняет взаимодействие с раствором.

Система гипс — равновесная с гелем жидкость. Качественно состав равновесной жидкости не отличается от состава жидкой фазы геля, однако она содержит компоненты в значительно меньших количествах. В этой системе за одни сутки в реакцию вступило все количество кремнезема, щелочи и оксалат-иона (рис. 4.3). На поверхности гипса образовался гелеобразный осадок. После того как прореагировали указанные компоненты раствора, началось растворение гипса. Выполненные исследования показывают, что растворы, содержащие компоненты ЩАС-рецептуры, активно взаимодействуют с гипсом. В результате взаимодействия гипса с исследованными растворами на его поверхности образуются труднорастворимые соединения, снижающие интенсивность химических реакций.

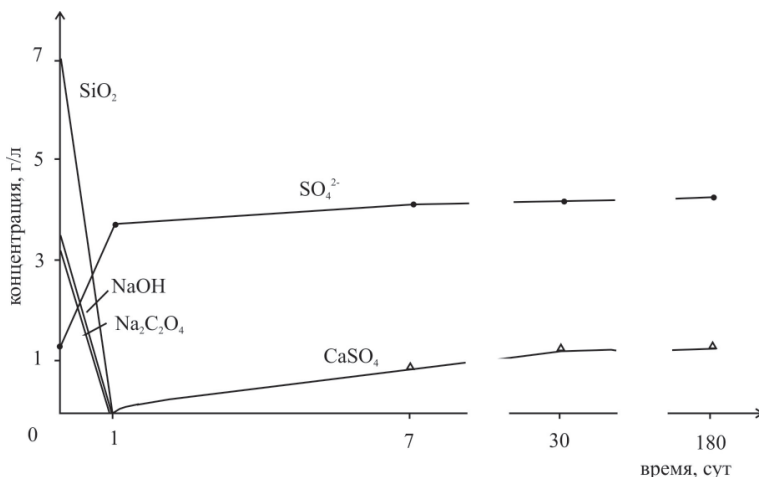


Рис. 4.3. Изменение во времени концентрации компонентов в системе фракция гипса — равновесная с гелем жидкость

Опыты в динамических условиях. Для исследования была сконструирована при участии В. И. Сергеева установка (рис. 4.4), позволяющая оценивать изменение диаметра отверстия в гипсе при фильтрации через него различных растворов. В покрытом парафином диске гипса (1) толщиной 15 мм просверливалось отверстие диаметром 1 мм. Гипс помещался в специальную обойму (2), куда из сосуда Мариотта (3) при постоянном гидравлическом градиенте подавался раствор (4). Градиент контролировался манометрами (5). Во избежание взаимодействия щелочи растворов с углекислым газом воздуха последний поступал в емкость с раствором через поглотитель CO_2 (6). Для измерения расхода поток раствора, профильтровавшегося через отверстие в гипсе, преобразовывался в капельный.

Расходомер, разработанный автором совместно с В. А. Субботиным, состоит из фотодатчика каплей (7, 8); электронного устройства (9), включающего счетчик импульсов, таймер, выходной блок; блока питания и регистрирующего прибора — самописца (10). В фотодатчике для устранения влияния внешнего освещения применены приборы, работающие в инфракрасной области спектра — светодиод (7) и фотодиод (8). Капля жидкости, пролетая между ними, уменьшает освещенность фотодиода, что вызывает

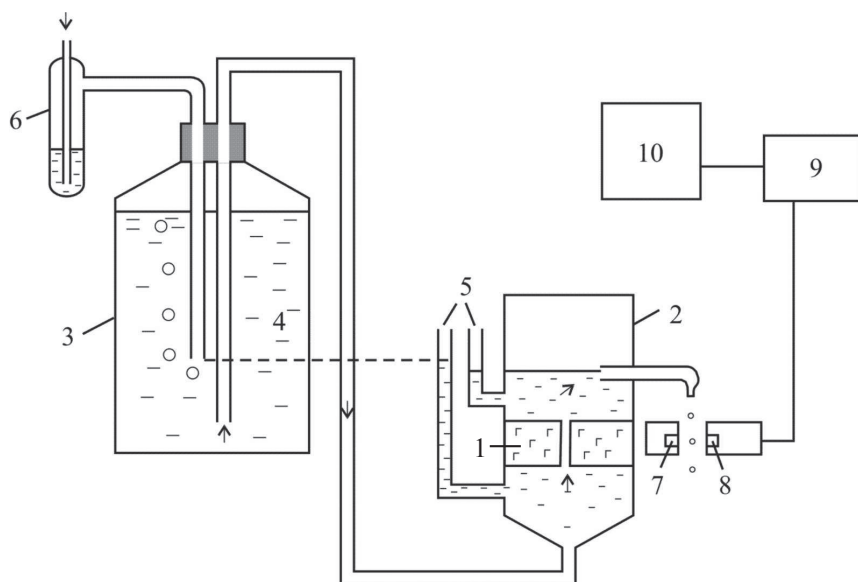


Рис. 4.4. Схема фильтрационной установки (пояснения в тексте)

увеличение сопротивления его р-п перехода и уменьшение тока, протекающего через фотодиод. Это изменение тока усиливается и поступает на пороговое устройство, которое формирует его в импульс напряжения, идущий на счетчик. Десятичный счетчик с цифровой индикацией общего числа капель выполнен на микросхемах.

В зависимости от выбранного коэффициента деления через каждые 1, 10, 100, 1000 капель управляющий сигнал идет со счетчика на выходное устройство. Выходное устройство при поступлении на него сигнала со счетчика или таймера формирует импульс метки на регистрирующий прибор, причем амплитуда импульса временной метки вдвое превышает амплитуду импульса, регистрирующего капли. Таймер устройства позволяет формировать временные метки через интервал времени 15, 30 или 60 минут. Данный расходомер позволяет непрерывно автоматически измерять и регистрировать малые расходы жидкости в течение длительного времени, а бесконтактный способ измерения — работать с агрессивными жидкостями. К достоинствам прибора относится возможность измерять расходы в большом диапазоне: от 0 до 10 л/ч. Погрешность расходомеров, основанных на данном принципе, не превышает 2 % [160].

Как известно, величина расхода при движении жидкости в круглоцилиндрической трубе зависит от свойств жидкости: вязкости и удельного веса, гидравлического градиента и диаметра трубы [168]. В установке все перечисленные параметры, за исключением диаметра, не меняются в течение опыта. Следовательно, по увеличению или снижению расхода можно судить соответственно об увеличении или уменьшении диаметра отверстия, т.е. об изменении суммарного объема твердой фазы в ходе взаимодействия гипса с раствором. Изменение расхода пропорционально изменению диаметра в четвертой степени, что обеспечивает высокую чувствительность данного метода. Небольшая длина пути фильтрации через образец выбрана для того, чтобы концентрация раствора существенно не менялась вследствие взаимодействия с породой. Это дает возможность получить представление о результате воздействия на гипс раствора с определенной концентрацией. Изменение концентрации раствора в процессе движения по трещинам, имеющее место в массиве, в известной мере учитывалось: в опытах использовались растворы различных концентраций.

Опыты проводились со ЩАС-золею и жидким стеклом плотностью 1,19 г/см³, разбавленными в разное число раз, а также растворами оксалата натрия, гидроокиси натрия и дистиллированной водой. Особое внимание уделялось растворам с большим разбавлением, поскольку концентрации компонентов ЩАС-золя в постинъекционных растворах незначительны. Фильтрация велась при гидравлических градиентах 1,7 и 0,17, что обеспечивало скорости движения раствора заведомо большие, чем в массиве. Ко-

личественный расчет изменения диаметра во времени по изменению величины расхода не проводился. Это вызвано тем, что на входном участке канала существует область, где отсутствует пуазелевское течение [91] и, следовательно, нельзя применять известную формулу Пуазеля, учитывая, что длина самого канала в наших опытах невелика.

Новообразования на поверхности гипса изучались на сканирующем электронном микроскопе и рентгеновском дифрактометре.

Результаты исследований. При фильтрации дистиллированной воды происходит интенсивное растворение гипса, о чем свидетельствует нарастание расхода во времени. При гидравлическом градиенте 1,7 за 6 часов расход увеличился более чем в 10 раз (рис. 4.5), при градиенте 0,17 аналогичное увеличение расхода произошло за 10 часов (рис. 4.6).

При воздействии на гипс растворов, содержащих компоненты ЩАС-рецептуры, наблюдается иная картина. Применение раствора оксалата натрия приводит к зарастанию канала и прекращению фильтрации, причем с уменьшением концентрации раствора процесс протекает более интенсивно

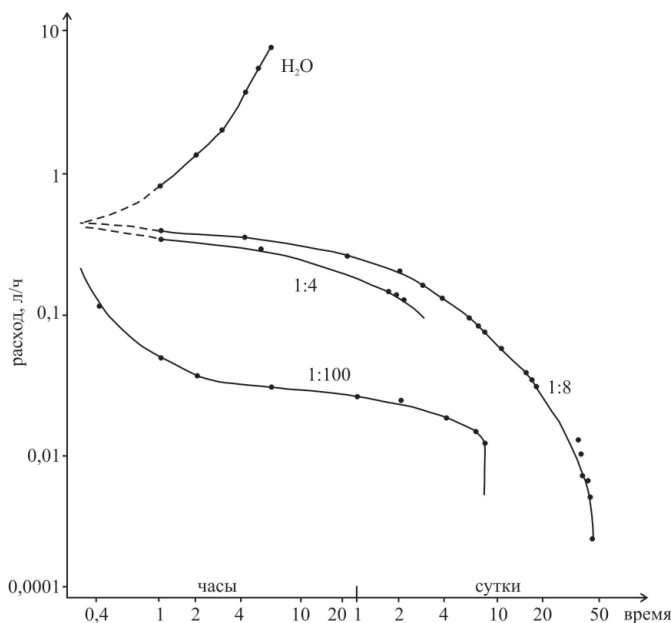


Рис. 4.5. Изменение расхода во времени при фильтрации ЩАС-золя разной степени разбавления (гидравлический градиент 1,7)

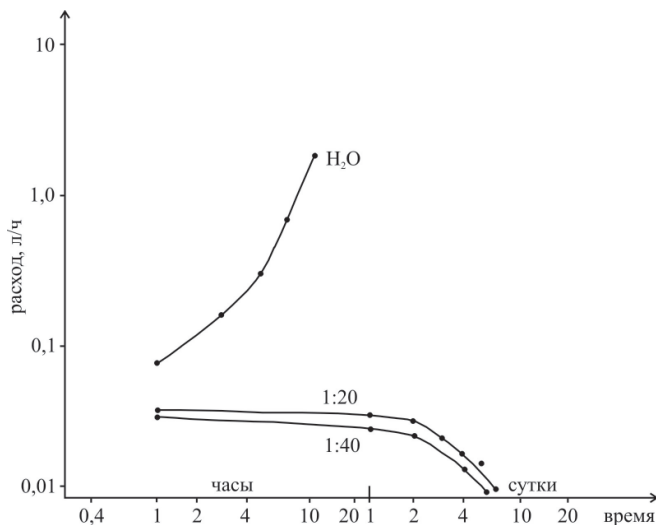


Рис. 4.6 Изменение расхода во времени при фильтрации ЩАС-золя разной степени разбавления (гидравлический градиент 0,17)

(рис. 4.7). Рентгенометрическое изучение вещества, образовавшегося в канале, показало, что оно состоит из оксалата кальция, характеризующегося линиями с $d = (6, 18, 4, 41, 2, 77) \cdot 10^{-10}$ м. На электронно-микроскопическом снимке видно, что сформировавшаяся на гипсе пленка состоит из беспорядочно расположенных кристаллов различной формы и размера (рис. 4.8). Кристаллы неплотно прилегают друг к другу, образуя рыхлую структуру.

Фильтрация в течение 2 суток 0,25 н раствора гидроокиси натрия не привела к изменению диаметра отверстия в гипсе (рис. 4.7). Исследования взаимодействия гипса со щелочью ограничены этим опытом, поскольку на гипс в закрепленном массиве будет воздействовать не щелочь в чистом виде, а силикат натрия.

Растворы, приготовленные разбавлением силиката натрия плотностью 1,19 г/см³ в 4–500 раз, в процессе фильтрации приводят к образованию пленки на гипсе и снижению диаметра канала. При разбавлениях 1:4, 1:20 этот процесс развивается медленно (рис. 4.9). Растворы с разбавлением 1:100–1:500 взаимодействуют с гипсом намного активнее, что ведет к прекращению фильтрации через 45 мин — 3 сут. Опыты с меньшими градиентами при таких разбавлениях провести не удалось, так как сразу после начала фильтрации канал в гипсе заполнялся гелеобразным веществом и фильтрация прекращалась.

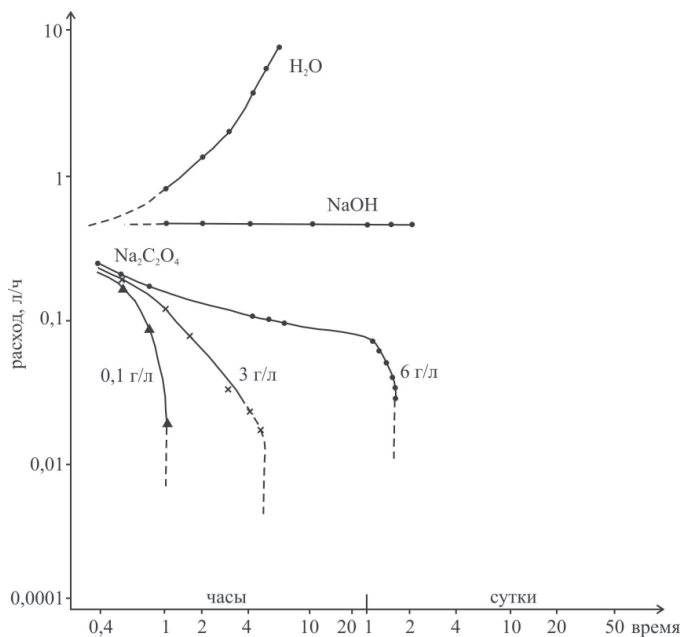


Рис. 4.7. Изменение расхода во времени при фильтрации растворов оксалата натрия и гидроокиси натрия (гидравлический градиент 1,7)

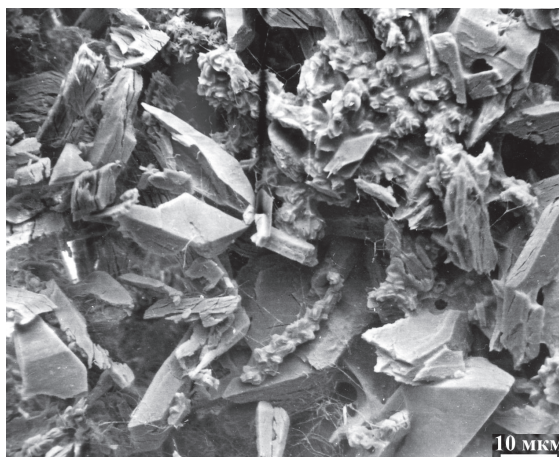


Рис. 4.8. Микростроение плёнки оксалата кальция, сформировавшейся на гипсе при фильтрации раствора оксалата натрия

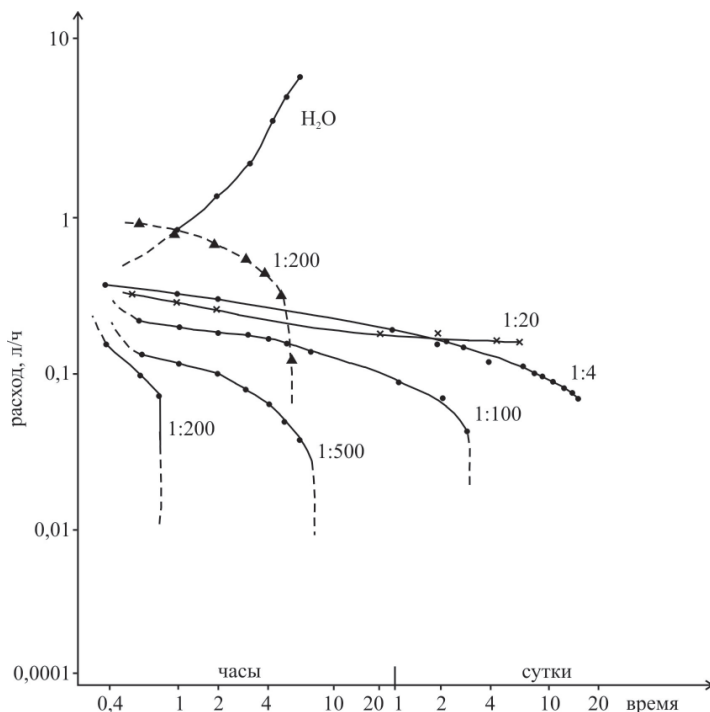


Рис. 4.9. Изменение расхода во времени при фильтрации раствора силиката натрия плотностью $1,19 \text{ г/см}^3$ разной степени разбавления. Гидравлический градиент 1,7. Пунктиром показано изменение расхода при начальном диаметре отверстия 2 мм и гидравлическом градиенте 0,8

Был проведен опыт при диаметре отверстия в гипсе 2 мм (гидравлический градиент 0,8, разбавление 1:200), т.е. с еще большей скоростью движения раствора. Фильтрация прекратилась через 6 часов вследствие зарастания канала (рис. 4.9).

Рентгенографическое исследование показало, что заполнитель канала в опыте с разбавленным в 100 раз раствором силиката натрия представляет собой вещество типа тоберморитового геля с одной слабой линией с $d = 3,04 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ [45]. Гель имеет неоднородную структуру, что видно при исследовании его под электронным микроскопом (рис. 4.10). В узкой зоне контакта с гипсом наблюдаются кристаллические новообразования (рис. 4.10 б), которые по мере удаления от поверхности гипса переходят в гелеобразную массу, образованную мельчайшими структурными элементами (рис. 4.10 в). Гель, расположенный ближе к центру канала, образован глобулярными частицами (рис. 4.10 г).

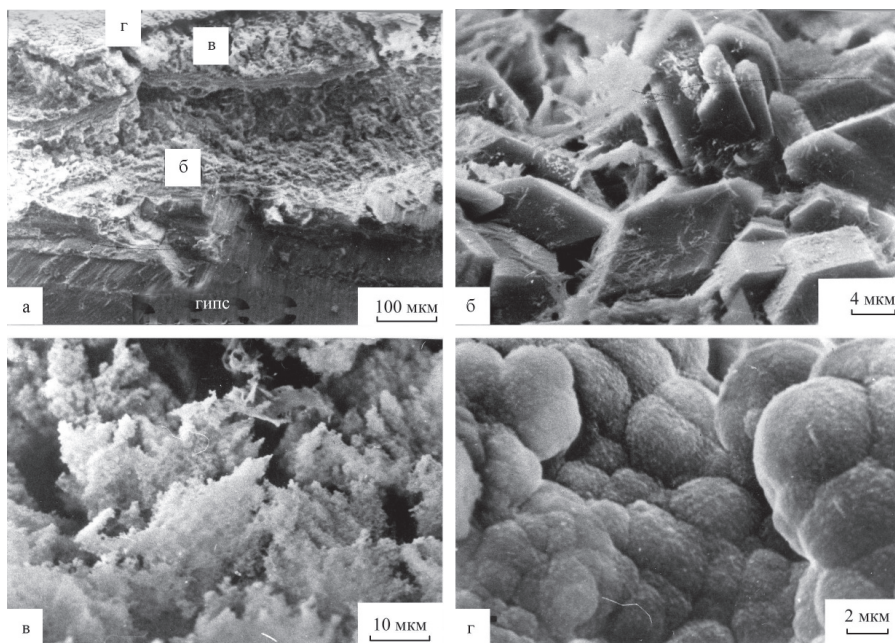


Рис. 4.10. Микростроение пленки, образовавшейся на гипсе после фильтрации силиката натрия: а — общий вид, б — зона контакта гипса и пленки, в — средняя часть пленки, г — поверхность пленки

Фильтрация растворов, представляющих собой разбавленный в 4-100 раз ЩАС-золь, также сопровождается зарастанием канала в гипсе, причем с увеличением разбавления этот процесс протекает интенсивнее (рис. 4.5, 4.6). Так, при разбавлении 1:100 через 2 часа после начала опыта расход снизился в 10 раз, а при разбавлении 1:8 для этого понадобилось 15 суток. Рентгенометрическим исследованием установлено, что кристаллическая фаза новообразований в опыте с разбавлением 1:100 представлена дигидратом оксалата кальция, определенным по линиям с $d = (6,14, 5,91, 4,40, 3,91, 3,67, 2,77, 2,49, 2,41, 2,24, 2,12, 1,96, 1,90, 1,83, 1,72) \cdot 10^{-10}$ м и аналогичным линиям в опытах с другими разбавлениями.

В более концентрированных растворах линии оксалата кальция выражены слабее. Изучение новообразований на сканирующем электронном микроскопе показало, что ближняя к гипсу часть пленки образована чешуйчатыми кристаллами, по-видимому, оксалата кальция (рис. 4.11). Ближняя к центру канала часть пленки представлена округлыми частицами, образующими гелеподобную структуру.

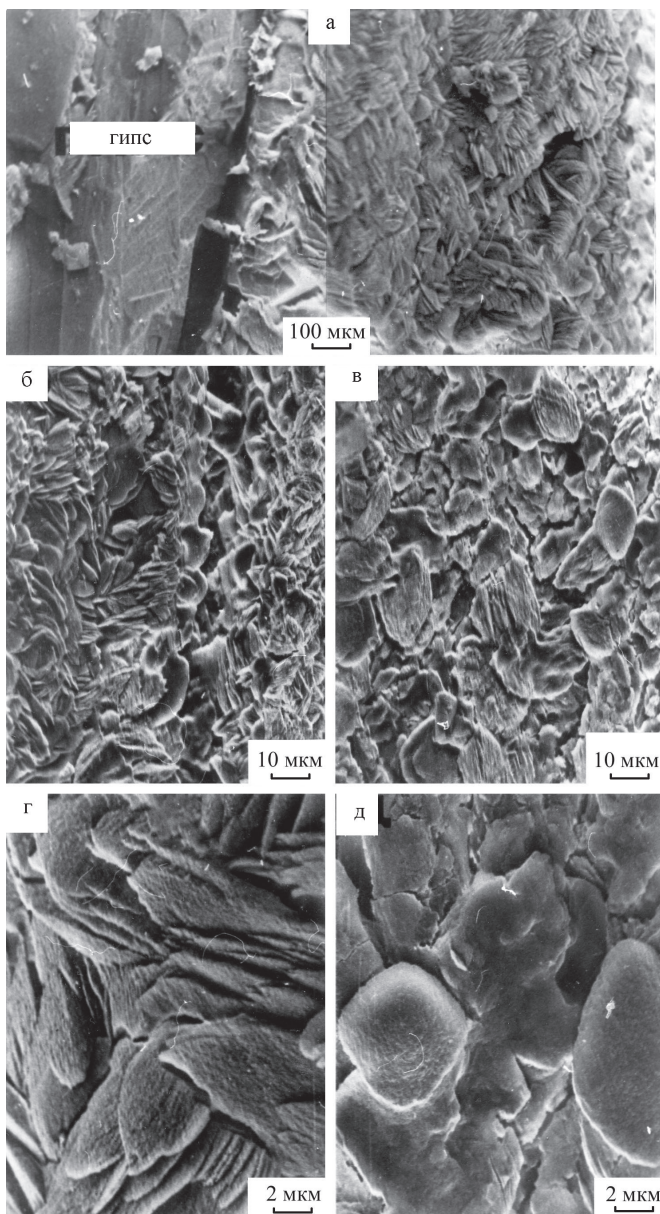


Рис. 4.11. Микростроение пленки, образовавшейся на гипсе после фильтрации ЩАС-золя, разбавленного в 8 раз: а — контакт гипса и пенки; б, г — средняя часть; в, д — участок около центра отверстия

Для оценки устойчивости новообразований и их способности предохранять гипс от растворения в некоторых опытах после образования пленки через канал фильтровалась дистиллированная вода. Опыты показали, что через некоторое время происходит растворение гипса, которое ведет к образованию пустот между гипсом и пленкой и в дальнейшем к ее механическому разрушению. Пленки, образовавшиеся в опытах с концентрированными растворами, в ряде случаев после фильтрации дистиллированной воды сохранялись длительное время в канале в виде полых цилиндров. Изменение расхода дистиллированной воды в этих опытах не дало воспроизводимых результатов, поскольку процесс разрушения пленки происходит не однообразно и, как правило, начинается не в канале, а в узкой незапарафированной области вокруг отверстия.

Для изучения защитных свойств пленки был проделан следующий опыт. В стакан с дистиллированной водой объемом 300 мл на подставках помещались одинаковые по площади пластинки чистого гипса и гипса с пленкой, которая была нанесена на гипс путем его погружения на 11 суток в ЩАС-золь, разбавленный в 4 раза. Растворы в стаканах через определенные промежутки времени анализировались на содержание кальция. На протяжении всего опыта растворы перемешивались магнитной мешалкой для поддержания одинаковой концентрации по всему объему. Полученные кривые растворения гипса во времени (рис. 4.12) показывают, что пленки оказывают лишь определенное тормозящее действие на скорость растворения гипса, но не изолируют гипс от воздействия воды.

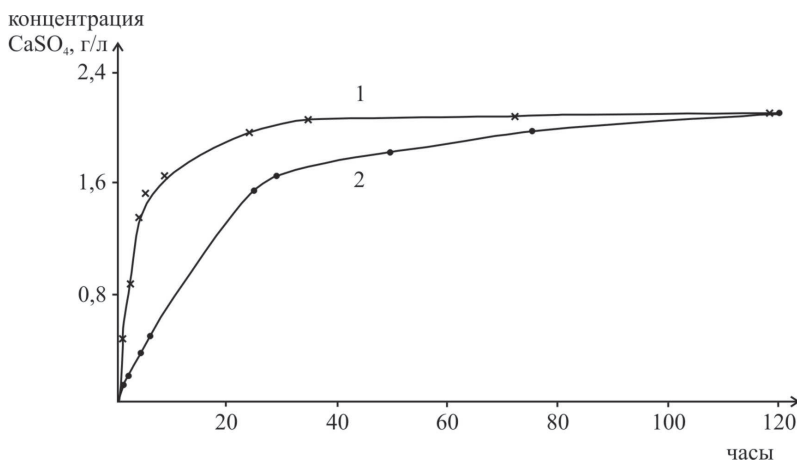


Рис. 4.12. Насыщение дистиллированной воды, контактирующей с гипсом:
1 – без пленки, 2 – с пленкой

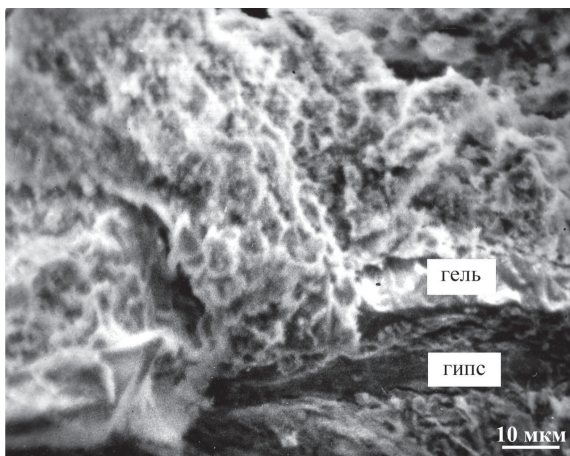


Рис. 4.13. Характер контакта гипса и геля после 6 месяцев

Изучение процессов на контакте гель — гипс. Опыты проводились по следующей схеме. Пластинки гипса и каменной соли, взятой для сравнения, помещались в бюксы и заливались ЩАС-золом. После образования геля одни бюксы герметизировались, в других гель находился в проточной дистиллированной воде. Через 6 месяцев каменная соль растворилась в обоих случаях. На поверхности геля над образцом образовалось углубление. Пластина гипса в опыте с промывкой частично растворилась. В опыте без промывки растворения не произошло. Электронно-микроскопическое исследование показало, что контакт геля с гипсом в опыте без промывки четкий, признаков растворения гипса нет (рис. 4.13). Гель в зоне контакта плотнее, чем на некотором удалении от нее. В опыте с промывкой геля (близком к схеме «В» рис.3.1) произошло образование кристаллов оксалата кальция различной формы (рис. 4.14). Кристаллы обнаружены также на поверхности частично растворенного гипса. Гель в ближней к гипсу области уплотнялся, имел более густой по тону белый цвет. Таким образом, можно говорить, что при контакте геля и гипса не происходит растворения гипса и не наблюдаются нежелательные изменения геля.

Взаимодействие гипса с интермицеллярной жидкостью геля приводит к уплотнению его в зоне контакта, что затрудняет поступление реагентов к поверхности гипса и ведет к затуханию реакции. При контакте геля с каменной солью указанные процессы не происходят, и каменная соль растворяется в жидкой фазе геля. Гель, как и пленки, описанные выше, не изолирует полностью гипс от растворяющего действия воды.

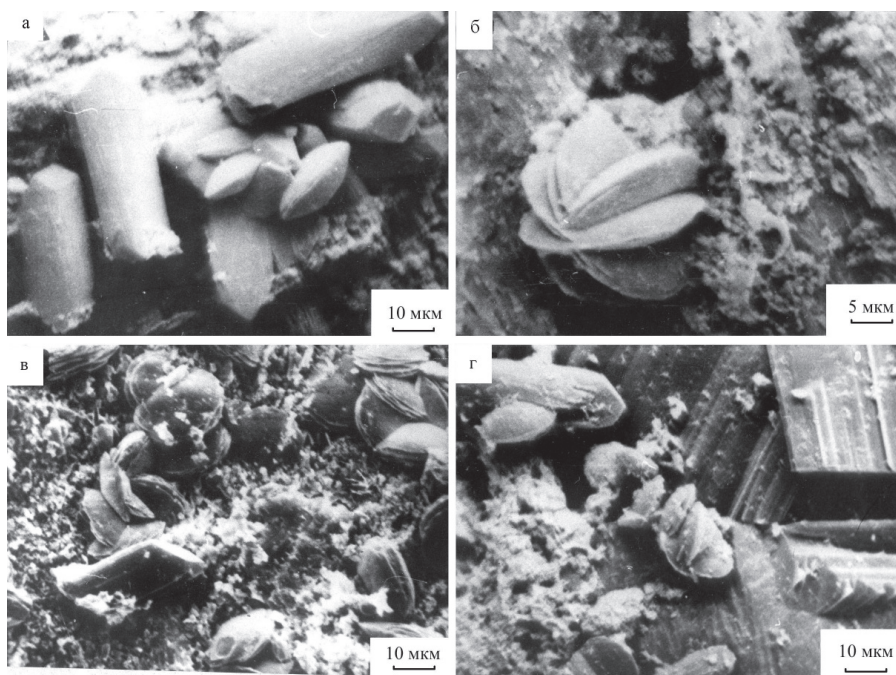


Рис. 4.14. Кристаллы оксалата кальция, образовавшиеся в геле при контакте гипса и геля

Выполненные исследования показывают, что при взаимодействии гипса с растворами, содержащими компоненты ЩАС-геля, на поверхности гипса образуется пленка, состоящая из оксалатов и гидросиликатов кальция. Суммарный объем твердых продуктов реакции больше, чем объем вступившего в реакцию гипса.

Механизм роста пленки можно представить следующим образом. В первый момент взаимодействия с раствором на поверхности гипса формируются новообразования. Реагенты из раствора диффундируют через образующуюся пленку, вступают в реакцию с гипсом, и формирующиеся вновь соединения как бы отодвигают «старую» пленку от поверхности гипса в направлении центра канала. Толщина пленки увеличивается в двух направлениях: в меньшей степени вглубь гипса и в большей степени в противоположном направлении.

Неоднородное строение пленки вызвано тем, что в процессе ее роста меняется концентрация реагентов, поступающих в сферу реакции вследствие увеличения толщины и проницаемости пленки. Изменение концен-

трации и соотношения компонентов приводит к различной интенсивности их взаимодействия с гипсом. Например, в опыте с ЩАС-золею, разбавленным в 8 раз, пленка состоит из двух частей – гелеобразной и кристаллической (рис. 4.11). По-видимому, гипс первоначально реагировал в основном с силикатом натрия. Затем, по мере нарастания пленки и затруднения диффузии более крупных молекул кремнезема, реакция гипса с оксалат-ионом стала более интенсивной.

Увеличение скорости нарастания пленки при уменьшении концентрации растворов, очевидно, связано с формированием более рыхлой пленки при взаимодействии гипса с разбавленными растворами. Такая пленка слабо препятствует поступлению реагентов в сферу реакции. Увеличение интенсивности взаимодействия с гипсом при снижении концентрации раствора силиката натрия согласуется с данными других исследователей [8]. Это явление, возможно, также связано с неодинаковой реакционной способностью различных форм кремнезема в растворе, соотношение которых зависит от водородного показателя, изменяющегося при разбавлении силиката натрия.

Таким образом, активность пленкообразования будет нарастать по мере уменьшения указанных компонентов в постинъекционных растворах, которое происходит в процессе их движения в массиве в результате разбавления и химических реакций с породами и подземными водами.

Проведенные исследования позволяют говорить, что применение ЩАС-раствора для закрепления гипсоносных пород не оказывает отрицательного действия на химическую устойчивость гипса. При взаимодействии гипса с постинъекционными растворами на его поверхности формируются пленки труднорастворимых соединений. Этот процесс идет с увеличением суммарного объема твердой фазы, что ведет к заполнению пустот в гипсе, т.е. происходит тампонирующее действие пород. Образующиеся на гипсе пленки практически нерастворимы и устойчивы к гидродинамическому воздействию потока при скоростях, существующих в районе завесы. Пленки в некоторой степени уменьшают скорость растворения гипса.

5. ВЛИЯНИЕ ПОСТИНЪЕКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА КАЧЕСТВО ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ЗАВЕСЫ В ГИПСОСНЫХ ПОРОДАХ

5.1. Закономерности формирования техногенно- геохимических систем

Инъекционное закрепление пород с целью создания противофильтрационной завесы является одним из видов инженерно-хозяйственной деятельности человека, ведущей к возникновению техногенно-геохимических систем. Согласно С. Д. Воронкевичу [24, 32], под техногенно-геохимической системой понимают искусственное тело с определенными геометрическими очертаниями, которое сформировалось или может сформироваться путем такого воздействия человека на геологическую среду, в результате которого произойдет изменение геохимических параметров среды, отражающееся в существенном изменении ее свойств, а также в изменении существующих геологических или появлении новых инженерно-геологических процессов.

Изучение закономерностей возникновения и развития техногенно-геохимических условий в основании Камской ГЭС после создания завесы явилось основой для комплексной оценки влияния постинъекционных процессов на качество завесы и химическую устойчивость гипса.

Оценка сохранности гипса может производиться по изменению коэффициентов фильтрации гипсоносных пород во времени. Качество противофильтрационных завес также определяется коэффициентами их фильтрации. Это позволяет использовать изменение коэффициентов фильтрации пород в районе противофильтрационной завесы как количественный критерий суммарного результата проявления всех постинъекционных процессов. Анализируя изменение коэффициентов фильтрации во времени и пространстве совместно с изменением геохимической обстановки, можно сделать выводы о направленности, интенсивности, продолжительности постинъекционных процессов, а также о размерах области, где они протекают.

Для получения величин коэффициентов фильтрации гипсоносных пород в основании Камской ГЭС был применен комплекс обратных расчетов, каждый из которых давал возможность получить распределение коэффициентов фильтрации под плотиной в определенный момент времени. Затем полученные значения сравнивались, что позволяло выявить тенденции изменений коэффициентов фильтрации на том или ином этапе развития техногенно-геохимической системы.

Оценка изменения фильтрационных параметров пород в основании плотины производилась для двух этапов. На первом этапе анализировалось

изменение коэффициентов фильтрации в период существования цементационной завесы (1965 и 1973 гг.). Второй этап соответствовал доуплотнению завесы ЩАС-раствором (1978 и 1982 гг.).

Подбор коэффициентов фильтраций производился таким образом, чтобы значения расчетных напоров в соответствующих точках совпали с данными натурных наблюдений в пьезометрах. При этом распределение коэффициентов фильтрации является однозначным, если известен хотя бы один коэффициент фильтрации пород в любой области под плотиной, полученный в результате полевых экспериментов при инженерно-геологических изысканиях [94].

Моделирование фильтрации производилось методом конечных элементов. Выбранный метод дает возможность более полно и быстро учитывать в расчетах инженерно-геологические особенности скальных оснований гидротехнических сооружений. К ним относятся анизотропия и неоднородность пород, слагающих массив, сложные геометрические контуры инженерно-геологических элементов массива и др. С помощью метода конечных элементов можно легко задавать различные граничные условия, менять размеры элементов, уменьшая их в местах большого изменения исследуемой величины, например, изменения напоров в районе завесы. Этот метод делает возможным производить расчеты при наличии соседних элементов с любыми различиями в свойствах, что трудно учитывать при использовании других методов. Отмеченные свойства позволяют осуществить простой переход от данных инженерно-геологических изысканий к расчетной схеме массива и сравнительно просто анализировать полученные результаты [56].

Теория метода конечных элементов и возможность их применения для решения фильтрационных задач рассмотрена в работах Э.Р. Митчелла и Р. Уэйта [103], В.В. Семенова, С.Б. Ухова [131, 132] и др. В связи с этим на изложении теоретических основ метода в данной работе мы не останавливаемся.

Для моделирования фильтрации в основании Камской ГЭС использовалась программа «фильтр», реализующая метод конечных элементов, которая была разработана С. Н. Емельяновым [56]. Программа предназначена для расчета двумерной кусочно-однородной анизотропной стационарной фильтрации несжимаемой жидкости. Она позволяет получить значения напоров в каждой узловой точке сетки разбивки расчетной области. Для этого необходимо ввести значения координат узловых точек сетки разбивки, массив коэффициентов фильтрации пород и ряд массивов, отражающих граничные условия. Расчеты проводились для двумерных плоских областей, сетка разбивки состояла из треугольных элементов, узловые точки размещались в вершинах треугольников.

5.2. Изменение фильтрационных параметров пород на различных этапах развития техногенно-геохимических систем

Комплекс взаимосвязанных расчетов производился по разрезу, ориентированному перпендикулярно оси плотины. Выбор разреза для составления расчетной схемы должен осуществляться исходя из следующих положений: а) фильтрационный поток должен быть плоским в разрезе и иметь слабую деформацию в плане, т.е. направление разреза должно быть ортогонально линиям пьезометрических напоров; б) при этом на линии разреза должно быть максимальное количество пьезометров, по которым имеются данные напоров в интересующие нас периоды времени. Этим условиям отвечает разрез в районе первой секции плотины (рис. 5.1). Кроме того, инъекционные работы на выбранном участке были завершены значительно раньше, чем на других, что дало дополнительное преимущество при оценке влияния постинъекционных процессов на проницаемость пород. Разрез составлен по данным изысканий при строительстве ГЭС с некоторыми дополнениями [33].

В расчетной схеме значения коэффициентов фильтрации нижнесоликамского водоносного горизонта (0,25 м/сут), водоупора между нижнесоликамским и верхнесоликамским водоносными горизонтами (0,009 м/сут) и вертикальной составляющей нижней части шешминского водоносного горизонта (0,006 м/сут) получены по данным изысканий при строительстве ГЭС. Коэффициенты фильтрации верхнесоликамского и шешминского водоносных горизонтов для начального варианта расчета приняты на основании моделирования [33]. В начальном варианте использовались значения коэффициентов фильтрации цемзавесы 0,01 м/сут и завесы после доуплотнения — 0,0045 м/сут, установленные по данным опытных работ на завесе [33]. Цемзавеса в нижнесоликамском водоносном горизонте, по данным наблюдений за перепадами напоров на участке, практически отсутствует.

При расчетах учитывалась анизотропия коэффициентов фильтрации в вертикальном и горизонтальном направлениях, что обусловлено особенностями геологического строения. При решении задачи использовались данные режимных наблюдений в период, для которого характерны стабильные уровни напорной стационарной фильтрации, приходящийся на начало сентября.

Верхняя граница расчетной области, представляющая собой понур и подземный контур бетонных сооружений плотины, задавалась как непроницаемая. Боковые и нижняя границы задавались как границы с заданными напорами по данным пьезометров 119, 144, 241, 249, 256, 257, 268, расположенных по контуру расчетной области. При этом сетка разбивки составлялась таким образом, что пьезометры размещались в узловых точ-

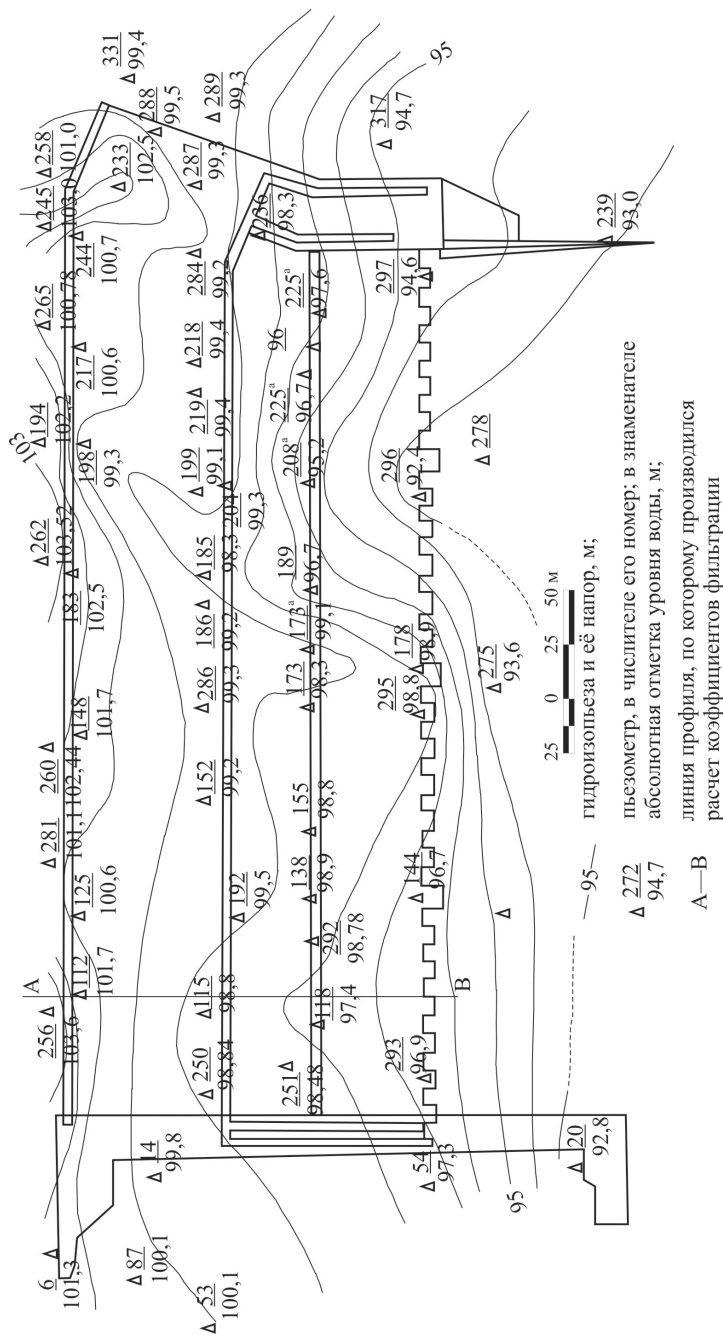


Рис. 5.1. Карта гидроизопьез по верхнесоликамскому водоносному горизонту на 5 октября 1973 г.

ках. На боковых границах в пределах одного водоносного горизонта, где отсутствовали пьезометры, задавались значения, одинаковые по вертикали и равные величине напора в пьезометре, расположенном в пределах данного водоносного горизонта. Такое допущение возможно, поскольку по данным ранее выполненных исследований в пределах одного водоносного горизонта напоры по вертикали постоянны [33]. В пределах водоупоров, а также на нижней границе в точках, расположенных между пьезометрами, величины напоров рассчитывались путем линейной интерполяции.

Выбранная расчетная область разбивалась на 418 элементов треугольной формы (240 узловых точек). Наибольшую густоту сетка разбивки имеет в районе противифльтрационной завесы, так как здесь можно ожидать наибольшую величину градиента напоров (рис. 5.2). Значения рассчитанных напоров сравнивались с фактическими значениями напоров в пьезометрах 111, 114, 117 (шешминский водоносный горизонт) и 112, 115, 118 (верхнесоликамский водоносный горизонт). В случае расхождения значений напора с фактическими более чем на 5% (+0,5 м) по отношению к максимальному перепаду напоров в пределах расчетной схемы (около 10 м) изменяли соответствующие значения коэффициентов фильтрации в элементах.

Поскольку натурные данные о толщине завесы отсутствовали, этот параметр жестко не фиксировался, а менялся по ходу решения задачи.

Расчеты выполнены для четырех лет: начальным являлся 1965 г., когда были ликвидированы неполадки в пьезометрической сети. Коэффициенты фильтрации рассчитаны также для 1973 г. — перед началом доуплотнения завесы, для 1978 г. — после завершения инъекционных работ на данном участке и для 1982 г. Выбор указанных периодов дает возможность оценить изменение фильтрационных параметров до и после доуплотнения завесы, а также под влиянием постинъекционных процессов.

Результаты выполненных расчетов представлены на рис. 5.3, 5.4. Анализ динамики фильтрационных потоков в основании Камской ГЭС показывает, что в начальный период существования цементационной завесы (1965 г.), а также на всех этапах после ее доуплотнения основные направления движения подземных вод имеют сходный характер. Наблюдается перетекание вод из нижнесоликамского водоносного горизонта через относительный водоупор в верхнесоликамский водоносный горизонт. Взаимодействие потоков верхнесоликамского и шешминского водоносных горизонтов носит более сложный характер и определяется как геометрией подземного контура сооружений ГЭС, так и конкретной гидродинамической обстановкой на данном участке расчетной области. Перетекания через слабопроницаемый слой вод из шешминского в верхнесоликамский горизонт и наоборот отмечаются на различных участках расчетной области и даже на одном и том же участке, в зависимости от соотношения величин напоров.

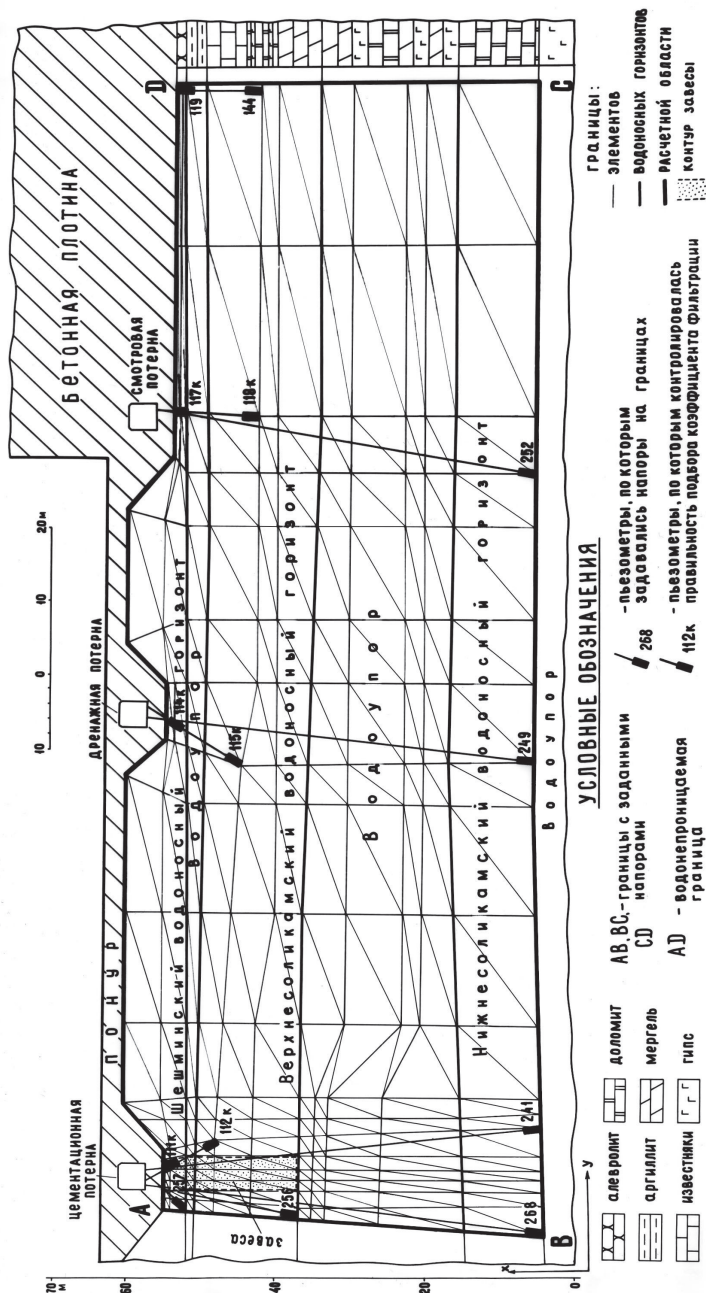


Рис. 5.2. Схема разработки расчетной области на элементы

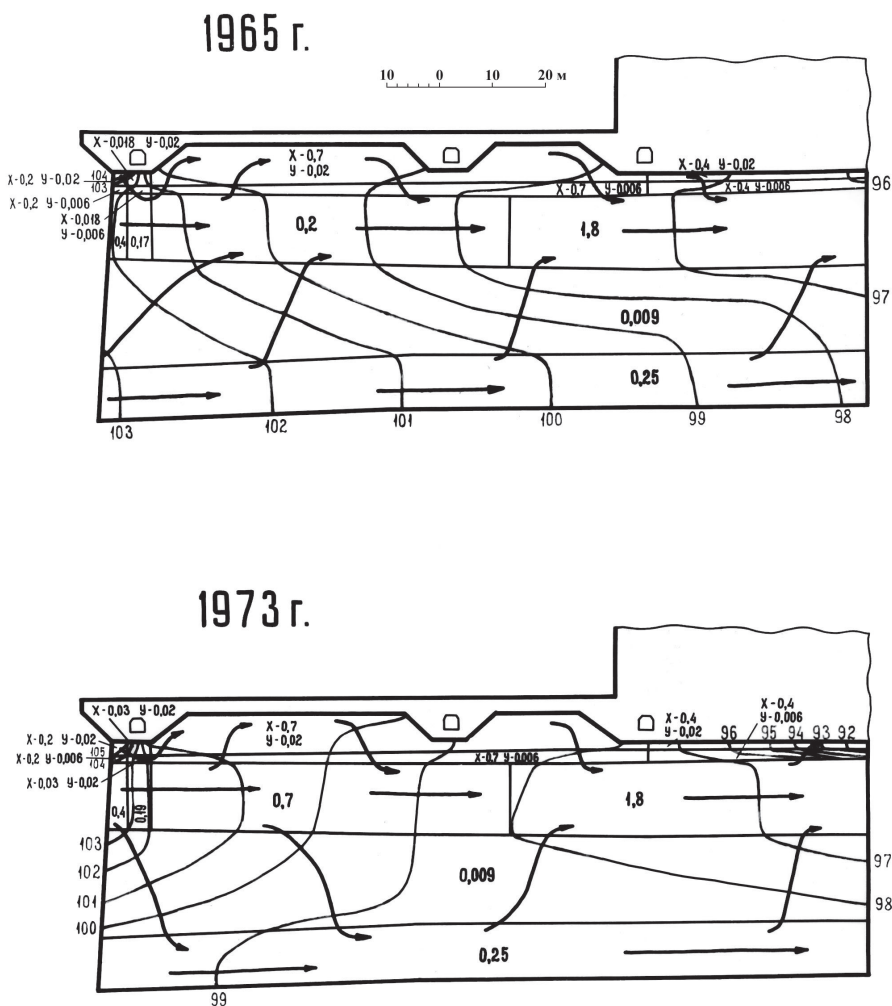


Рис. 5.3. Изменение фильтрационных параметров расчетной области в период существования цементационной завесы. Коэффициенты фильтрации, м/сут: 0,7 – изотропных пород; X – 0,2 – в горизонтальном направлении; Y – 0,2 – в вертикальном направлении; 97 – линии равных напоров; – направление движения подземных вод

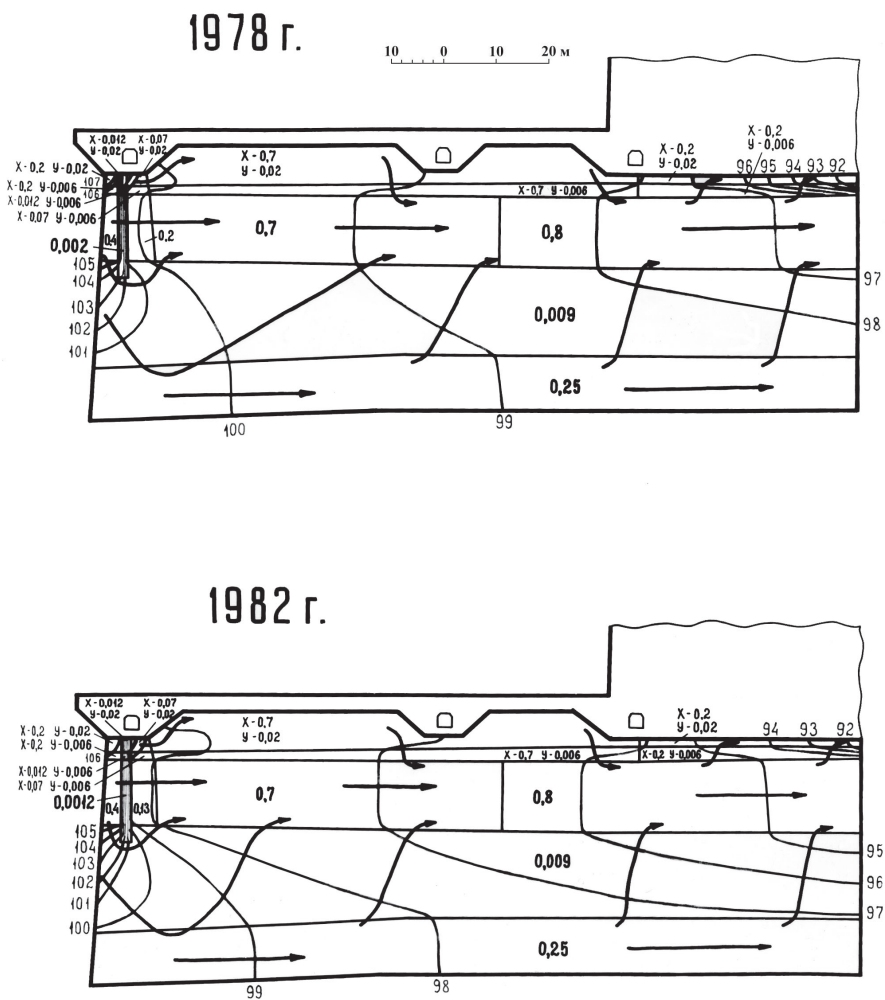


Рис. 5.4. Изменение фильтрационных параметров расчетной области в период после уплотнения завесы ЩАС- раствором (условные обозначения см. на рис. 5.3)

Значительно отличаются направления движения потоков в 1973 г., это обусловлено увеличением коэффициентов фильтрации цементационной завесы и пород в верхнесоликамском горизонте. В результате этого произошла инверсия направления движения потоков между нижнесоликамским и верхнесоликамским горизонтами на участке от цементационной до дренажной потерны.

Создание плотной завесы привело к изменению фильтрационной картины в основании плотины. Уменьшение напоров после доуплотнения завесы в верхнесоликамском водоносном горизонте усилило перетекание в него высокоминерализованных вод нижнесоликамского водоносного горизонта (рис. 5.4). Этот факт с точки зрения сохранности гипса следует рассматривать как положительный, так как разгрузка вод нижнесоликамского горизонта в верхнесоликамский, происходившая в естественных условиях, препятствовала развитию гипсового карста [116]. В результате усилившегося перетекания минерализация верхнесоликамского водоносного горизонта под плотиной возросла (рис. 5.5). Уменьшились коэффициенты фильтрации пород под плотиной (рис. 5.4), где перетекание наиболее интенсивно. Это можно объяснить осаждением солей при смешивании вод этих горизонтов, вызывающем тампонаж пород. Так, при отборе проб из пьезометра 118 в июле и августе 1980 г. вода имела черный цвет. После отстоя на дне сосуда появился обильный черный осадок, а вода стала прозрачной. Наличие осадка отмечалось и в пробах вод других пьезометров, расположенных в этом районе.

В 1973 г. отмечается минимальное падение напоров на завесе, максимальные значения величин напоров на большей части подземного контура гидроузла. Доуплотнение завесы вызвало некоторое увеличение напоров перед завесой, рост падения напора на завесе и соответствующее снижение величин напоров за завесой. В 1982 г. перепад напоров на завесе достиг максимального значения (примерно 5 м) за рассматриваемый период.

Расчет средних значений фильтрационных расходов потоков на участке под плотиной показывает, что самым мощным водоносным горизонтом, по которому протекает около 75 % расхода от общего фильтрационного потока под плотиной, является верхнесоликамский водоносный горизонт. Увеличение коэффициентов фильтрации цементационной завесы в период с 1965 г. по 1973 г. (рис. 5.3) привело к увеличению в 2 раза величины расходов потоков в шешминском и верхнесоликамском горизонтах. Доуплотнение завесы и проявление постинъекционных процессов приводит к снижению общего расхода потока под плотиной на 20 % по сравнению с 1965 г., почти в 2 раза по сравнению с 1973 г. При этом по сравнению с 1965 г. наблюдается рост перетекания подземных вод через относительный водопор примерно в 2 раза (1978 и 1982 гг.).



Рис. 5.5 Изменение минерализации вод верхнесоликамского водоносного горизонта под плотиной (пьезометр 118)

Главной целью математического моделирования являлось изучение изменения во времени коэффициентов фильтрации пород в основании Камской ГЭС. Полученные результаты показывают, что коэффициент фильтрации цемзавесы в шешминском водоносном горизонте возрос в период с 1965 по 1973 г. почти в 2 раза. В верхнесоликамском водоносном горизонте на данном участке завеса практически неэффективна. В указанный период в 3,5 раза увеличился коэффициент фильтрации на участке между цемзавесой и вертикальным дренажом (рис. 5.3). Это, по-видимому, связано с растворением гипса, которому способствовало периодическое включение дренажа.

В результате проведения инъекционных работ в зоне цементационной завесы, примыкающей к верхнему бьефу, в шешминском и верхнесоликамском водоносных горизонтах создана высокоплотная противифльтрационная завеса толщиной около 2 м (рис. 5.4). После доуплотнения завесы ЩАС-раствором ее коэффициент фильтрации уменьшился, причем наибольший эффект достигнут в тонкотрещиноватых породах верхнесоликамского водоносного горизонта, где он снизился с 0,19 до 0,002 м/сут, т.е. почти в 100 раз. Непосредственно за завесой также произошло некоторое снижение коэффициентов фильтрации в зоне мощностью около 5 м, что связано с гелеобразованием в зоне разбавления ЩАС-раствора и последующими постинъекционными процессами.

Иная картина наблюдается в верхнесоликамском водоносном горизонте, сложенном породами с высоким содержанием гипса (до 35 %), для ко-

торого характерны минерализованные подземные воды (более 2 г/л) со значительной концентрацией солей кальция и магния. Здесь за 4 года после окончания инъекционных работ в 2 раза уменьшился коэффициент фильтрации как самой завесы, так и пород в прилегающей к ней зоне мощностью 5 м (рис. 5.4). Снижение коэффициентов фильтрации происходит вследствие тампонирувания остаточных трещин в теле завесы и трещин в зоне за ней за счет рассмотренных постинъекционных процессов: осаждения компонентов постинъекционных растворов минерализованными подземными водами, уплотнения гелей, взаимодействия гипса с техногенными водами.

В разделе 2 выделены пять наиболее важных с практической точки зрения характеристик постинъекционных процессов. Оценим с помощью этих характеристик влияние постинъекционных процессов на фильтрационные свойства пород основания Камской ГЭС.

Направленность. Общей тенденцией химических и физико-химических процессов в закрепленном массиве является увеличение суммарного объема твердой фазы, т.е. своеобразное дополнительное тампонирувание пород. В конечном итоге в теле завесы или в непосредственной близости от нее весь кремнезем и оксалат-ион инъекционного раствора переходят в твердую фазу, причем в ее состав входят компоненты подземных вод — кальций и магний. Вовлечение в образование твердой фазы компонентов отвердителя, не участвующих в гелеобразовании, и ионов подземных вод является ценным свойством ЩАС-рецептуры, которое следует учитывать при синтезе новых рецептур. Постинъекционные процессы повышают химическую устойчивость гипса и геля. Таким образом, постинъекционные процессы имеют положительную направленность, так как снижают проницаемость гипсоносных пород основания ГЭС и повышают долговечность геля.

Интенсивность. Контрастность геохимической обстановки в системе массив — техногенные материалы обуславливают активное протекание постинъекционных процессов. Их интенсивность тесно связана с условиями массопереноса в массиве. На инъекционной стадии в условиях непрерывного поступления вещества интенсивность процессов определяется скоростью химических и физико-химических реакций. На постинъекционной — поступление реагентов в сферу реакции определяется скоростями диффузии вещества в геле и других новообразованиях, т.е. диффузия является лимитирующей стадией постинъекционных процессов. Уменьшение градиентов концентраций реагентов вследствие химических реакций и гидродинамической дисперсии приводит к постепенному затуханию процессов. Изменение интенсивности процессов во времени и в зависимости от минерализации подземных вод схематически показано на рис. 5.6. С увеличением содержания гипса в породах интенсивность постинъекционных процессов возрастает.





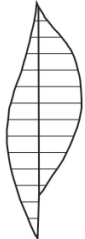
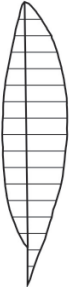
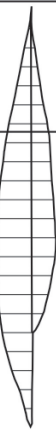




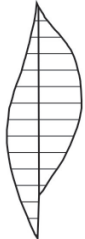
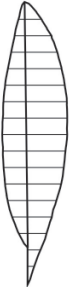
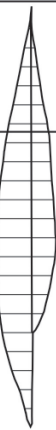




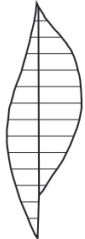
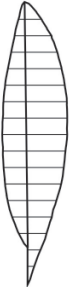
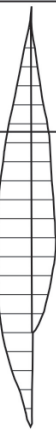

Ход инъекции	Стадия	Геообразование неразбавленного золя	Взаимодействие золя и подземных вод		Взаимодействие геля и подземных вод			Взаимодействие золя и постинъекционных растворов с гипсом	Взаимодействие геля с гипсом
			Разбавление золя в ходе инъекции	Геообразование разбавленного золя	Диффузия компонентов жидкой фазы геля в подземные воды	Осаждение диффундирующих из геля компонентов подземными водами	Уплотнение и рост кристаллов за счет диффузии в гель ионов Са и Mg из подземных вод		
Начало инъекции	Инъекционная								
Конец инъекции									
	Постинъекционная								

Рис. 5.6. Развитие физико-химических процессов в закрепляемом массиве. В левой части графы — для участков с низкой минерализацией подземных вод; в правой — с высокой

Продолжительность. Данные натурных наблюдений за химическим составом подземных вод, показывающие длительное поглощение кальция и магния в районе завесы, и расчет изменения фильтрационных параметров пород показали, что продолжительность постинъекционных процессов измеряется годами. В первое время они протекают активно; с течением времени их роль в изменении свойств пород снижается.

Область распространения. Внедрение химических реагентов в массив не вызывает коренных изменений общей геохимической обстановки основания плотины, как это предполагалось ранее [135]. Это связано, во-первых, с незначительным объемом инъекционных материалов по сравнению с объемом массива; во-вторых, с активным взаимодействием инъекционных материалов с породами и подземными водами, что ограничивает область

протекания реакций. Постинъекционные процессы локализованы в теле завесы и примыкающей к ней зоне мощностью около 5 м, т.е. геохимическое воздействие на природную среду, вызванное химическим закреплением, можно рассматривать как линейное. Изменения, вызванные постинъекционными процессами, происходят в зоне, ширина которой всего в 2-3 раза превышает толщину высокоплотной противofiltrационной завесы.

Результат воздействия. Проведенные исследования показали, что постинъекционные процессы при наличии вод с минерализацией более 2 г/л, содержащих кальций и магний, и наличии в породах гипса приводят к снижению в 2 раза проницаемости завесы и зоны, непосредственно прилегающей к ней. Для пород с низким содержанием гипса (до 1-2 %) и при невысокой минерализации подземных вод (менее 1 г/л) указанных явлений не наблюдается, однако не отмечено и увеличение проницаемости завесы, что имело место во время существования только цемзавесы.

5.3. Влияние изменения качества завесы на устойчивость Камской ГЭС

При наличии в основании плотин гипсоносных пород требуются надежные методы, позволяющие своевременно оценить эффективность противofiltrационных мероприятий и сохранность гипса. Основными показателями, используемыми для оценки эффективности работы противofiltrационных устройств, являются коэффициент устойчивости плотины на сдвиг и процент гашения напора на завесе. Изменения этих показателей по данным натурных наблюдений для различных секций бетонной плотины Камской ГЭС показаны на рис. 5.7. В результате доуплотнения завесы, которое производилось с 1975 г., увеличилось падение напора на завесе и коэффициент устойчивости сооружения, причем в целом наблюдался рост этих показателей после завершения работ (рис. 5.7; 5.8). Например, в первой секции до создания завесы в 1974 г. величина коэффициента устойчивости приближалась к критической (1,30). После создания завесы на данном участке (1978 г.) коэффициент составил 1,32, а к 1982 г. возрос до 1,45.

При расчете коэффициента устойчивости используется величина фfiltrационного напора на подошву бетонной плотины, т.е. этот показатель, как и процент гашения напора на завесе, в определенной степени зависит от величины напора. Сопоставление данных расчетов (рис. 5.3; 5.4) с результатами натурных наблюдений (рис. 5.7, 5.8) показывает, что на первом этапе развития техногенно-геохимической системы, соответствующем периоду существования цементационной завесы, эффективность ее работы (1965–1975 гг.) была на недостаточно высоком уровне. Падение напоров на завесе по натурным данным не превышало для шешминского водоносного горизонта 25% общего перепада напоров, а для верхнесоликамского – 15%. При этом по ряду секций отмечается снижение падения напоров на завесе во времени.

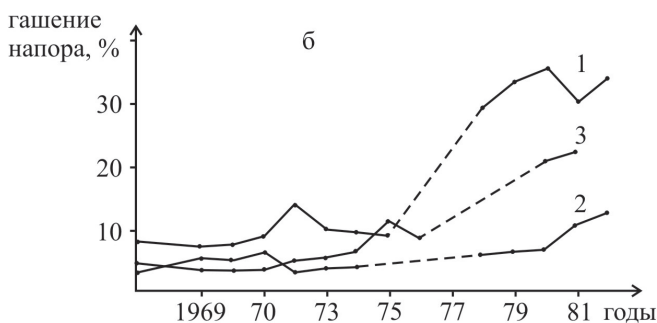
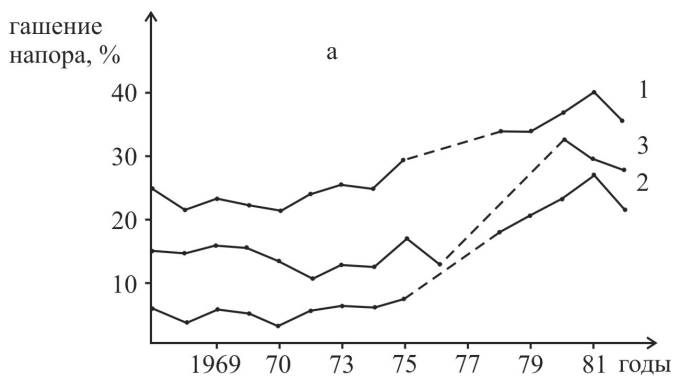


Рис. 5.7. Гашение напора на завесе в 1-й, 2-й и 3-й секциях:
а — в шешминском, б — в верхнесоликамском водоносных горизонтах
(по данным службы наблюдения Камской ГЭС)

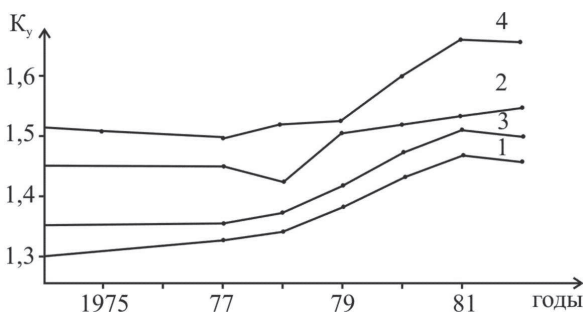


Рис. 5.8. Изменение коэффициента устойчивости плотины на сдвиг после доуплотнения завесы (по данным службы наблюдения Камской ГЭС):
1-4 — номера секций

В результате доуплотнения цементационной завесы существенно возросли величины падения напоров на завесе в шешминском и верхнесоликамском водоносных горизонтах, о чем свидетельствуют результаты натурных наблюдений (рис. 5.7; 5.8) и расчеты (рис. 5.3; 5.4). Это обусловило снижение фильтрационного давления на подошву гидросооружения и, соответственно, рост коэффициента устойчивости плотины на сдвиг.

Таким образом, постинъекционные процессы на втором этапе развития техногенно-геохимической системы приводят к дополнительному росту эффективности работы противofильтрационной завесы и повышению коэффициентов устойчивости плотины.

Выполненный комплекс взаимосвязанных расчетов и сопоставление с данными натурных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. На первом этапе развития техногенно-геохимической системы, отвечающем периоду существования только цементационной завесы, на исследованном участке коэффициент фильтрации завесы в шешминском водоносном горизонте увеличился в 2 раза, а в нижележащих водоносных горизонтах завеса практически неэффективна. Снижение качества завесы приводит к изменению гидродинамики потоков в основании Камской ГЭС, снижению коэффициентов устойчивости плотины, снижению минерализации подземных вод, что могло отрицательно сказаться на устойчивости гипса и привести к его растворению. В 3,5 раза возросли коэффициенты фильтрации пород верхнесоликамского горизонта в зоне между завесой и дренажом.

2. Доуплотнение ЩАС-раствором цементационной завесы обусловило создание высокоплотной завесы толщиной около 2 м в шешминском и верхнесоликамском водоносных горизонтах с коэффициентами фильтрации соответственно в 2,5 и 100 раз меньше по сравнению с цементационной завесой. Повышение качества завесы обусловило снижение фильтрационных расходов в основании плотины примерно в 2 раза и рост устойчивости плотины на сдвиг.

3. Постинъекционные процессы на второй стадии развития техногенно-геохимической системы, соответствующей созданию высокоплотной завесы с помощью ЩАС-раствора, приводят к формированию за завесой зоны толщиной около 5 м, в которой величины коэффициентов фильтрации снижаются в 10 раз. Со временем в условиях верхнесоликамского водоносного горизонта при наличии подземных вод с минерализацией более 2 г/л и присутствии в породах гипса более 2 % постинъекционные процессы обуславливают дальнейшее снижение коэффициентов фильтрации в 2 раза как в завесе, так и в зоне толщиной 5 м, примыкающей к завесе. Это приводит к дальнейшему повышению качества завесы во времени, к снижению расходов потоков и повышению их минерализации вследствие перетекания высокоминерализованных вод из нижнесоликамского водоносного горизонта, а также к повышению устойчивости плотины на сдвиг.

ВЫВОДЫ

1. Инъекционное закрепление оснований плотин приводит к изменению геохимической обстановки в закрепляемых массивах и возникновению химических и физико-химических процессов, которые могут существенным образом воздействовать на свойства пород, изменить гидродинамическую обстановку и повлиять на устойчивость сооружения. Наибольшую актуальность эта проблема приобретает при создании противофильтрационных завес с целью защиты от растворения пород в основании плотин, когда требуется повышенное внимание к оценке их химической устойчивости в новой техногенно-геохимической обстановке.

2. Анализ инженерно-геологических условий района противофильтрационной завесы Камской ГЭС позволил, с учетом химической активности природной среды и материалов, внедренных в породы, а также типов массопереноса в массиве, выделить системы, наиболее важные с точки зрения исследования процессов, влияющих на фильтрационные свойства пород. К таким системам относятся: инъекционный раствор — подземные воды, гель — подземные воды, гипс — постинъекционные растворы, гель — гипс. Исследованы механизм, физико-химическая сущность и направленность процессов в выделенных системах, что позволило оценить параметры техногенно-геохимической обстановки в массиве в целом.

3. На основании изучения особенностей миграции и осаждения кремнезема в природных условиях, проведенных лабораторных работ и анализа данных натурных наблюдений выявлены химические и физико-химические закономерности формирования состава техногенных подземных вод в районе завесы. Установлено, что щелочные кремнеземсодержащие растворы при смешивании с минерализованными подземными водами, содержащими кальций и магний, нейтрализуются, в результате чего происходит осаждение кремнезема. Роль диффузионного выноса компонентов интермицеллярной жидкости (кремнезема, щелочи, оксалат-иона) из геля в формировании химического состава вод при наличии в них ионов кальция и магния крайне ограничена. Эти ионы диффундируют в гель и переводят значительную часть указанных компонентов в твердую фазу внутри геля. Показано, что подземные воды содержат кремнезем, щелочь, оксалат-ион в низких концентрациях, находятся короткое время только в непосредственной близости от завесы. Осаждение этих компонентов ведет к дополнительному тампонажу пород.

4. Установлено, что при воздействии на гипс растворов, содержащих щелочь, кремнезем, оксалат-ион, на его поверхности образуются трудно-растворимые химически устойчивые соединения — оксалаты и гидросили-

каты кальция, что снижает в некоторой степени скорость растворения гипса. Показано, что в процессе взаимодействия в системе гипс — постинъекционные растворы отмечается заполнение пустот в гипсе этими соединениями вследствие увеличения суммарного объема твердой фазы, т.е. дополнительное тампонирующее пород.

5. При взаимодействии геля с подземными водами вследствие диффузии ионов кальция и магния в интермицеллярное пространство происходит хемосорбция этих ионов на поверхности скелета геля и гелеобразование интермицеллярной жидкости. Впервые показано, что при контакте тампонажных гелей с подземными водами в гелях возможен рост кристаллов труднорастворимых соединений, соизмеримых с величиной раскрытия тампонируемых трещин, что позволяет говорить об их своеобразной локальной цементации. Указанные процессы ведут к уплотнению геля, повышают его химическую устойчивость. Учитывая выявленный процесс формирования кристаллов, при разработке новых рецептов гелеобразующих растворов для тампонирования трещиноватых пород следует учитывать возможность подбора такого отвердителя, у которого компоненты, формирующие интермицеллярную жидкость, образовывали бы труднорастворимые соединения при взаимодействии с компонентами подземных вод.

6. Формирование специфической техногенно-геохимической обстановки оказало влияние на фильтрационные параметры пород основания. Расчет коэффициентов фильтрации путем математического моделирования показал, что до инъекции происходило увеличение проницаемости цемзавесы и гипсоносных пород во времени. После доуплотнения завесы ее коэффициент фильтрации снизился в 2,5 раза в шешминском и почти в 100 раз в верхнесоликамском водоносных горизонтах. За 4 года после окончания инъекционных работ в верхнесоликамском горизонте, для которого характерно высокое содержание гипса, коэффициент фильтрации завесы и зоны мощностью 5 м за ней снизился в 2 раза. Такое уменьшение проницаемости происходит за счет тампонирования остаточных трещин в теле завесы и за ее пределами вследствие рассмотренных постинъекционных процессов.

7. Процессы, возникающие при силикатизации гипсоносных пород, обеспечивают сохранность гипса и эффективность завесы. Наблюдается тенденция к увеличению эффективности завесы во времени, что повышает надежность защиты гипса от растворения и устойчивость плотины. Анализ воздействия инъекционного закрепления на геохимическую обстановку в массиве и результаты, достигнутые при создании завесы в основании Камской ГЭС, позволяют рекомендовать силикатные растворы для тампонирования гипсоносных пород в основаниях гидротехнических сооружений. Это позволит существенно повысить их безопасность в течение длительного периода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абрамова Т.Т., Сергеев В.И.* Влияние химического состава подземных вод на эффективность силикатизации пород // Матер. 2-й науч. конференции аспирантов и молодых ученых. - Сер. гидрогеол. - М.: Изд-во МГУ, 1975. С.101-107. Деп. в ВИНТИ 29 янв. 1976, № 247-76 Деп.
2. *Адамович А.Н.* Закрепление грунтов и противофильтрационные завесы в гидроэнергетическом строительстве. - М.: Энергия, 1980. - 320 с.
3. *Айлер Р.К.* Химия кремнезема. - М.: Мир, 1982. - 1127 с.
4. *Аксельруд Г.А., Молчанов А.Д.* Растворение твердых веществ. М.: Химия, 1977. - 272 с.
5. *Ананьев В.П., Коробкин В.И., Петренко Л.К.* О влиянии грунтовых вод на силикатизированные лессовые грунты // Закрепление грунтов в строительстве. - Киев, 1974. - С.117-119.
6. *Ананьев В.П., Шувалова Л.П., Морозов А.В.* Химический состав поровых растворов естественных и силикатированных лессовидных суглинков // Основания и фундаменты, строительство на просадочных грунтах. - Ростов н/Д, 1979. - С.101-106.
7. *Ананьев В.П., Шувалова Л.П., Трусова С.В.* К вопросу о взаимосвязи химико-минералогического состава лессовых грунтов и их упрочнения способом однорастворной силикатизации // Гидрогеология и инж. геология. - Новочеркасск, 1978. - С.117-121.
8. *Аскалонов В.В.* Силикатизация лессовых грунтов. - М.: Машстройиздат, 1949. - 40 с.
9. *Банник Г.И.* Основы технической мелиорации грунтов. - Киев: Высшая школа, 1972. - 272 с.
10. *Баушев В.К., Христов С.Г. и др.* Исследование вопросов восстановления плотности противофильтрационной завесы в тонкотрециноватых карбонатных породах основания плотины инъекцией фурановых смол // Матер. 7-го Всес. совещания по закреплению и уплотнению грунтов. - Л.: Энергия, 1971. - С.296-298.
11. *Белоусова Н.Е., Рослякова Н.Г. и др.* Изучение реакционной способности студнеобразной поликремнекислоты // Журн. прикл. химии. - 1979. Т.52, № 9. - С. 1945-1947.
12. *Белый Л.Д.* Ереванская плотина на р.Раздан // Геология и плотины. - Сер. 2. - Т.1. - М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. - С.30-34.
13. *Берг Л.Г., Николаев А.В. Равич М.И.* О защите гипса от растворения // Совещ. по закреплению грунтов и горных пород. - М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1941. - С.160-167.
14. *Блескина Н.А., Федоров Б.С.* Глубинное закрепление грунтов синтетическими смолами. - М.: Стройиздат, 1980. - 148 с.

15. *Богомолов Г.В., Плотникова Г.Н. Титова Е.А.* Кремнезем в термальных и холодных водах. - М.: Наука, 1967. - 112 с
16. *Бореков Г.К., Борисова С.М., Джигит В.А. и др.* Влияние условий приготовления на структуру силикагеля // Журн. прикл. химии. - 1948. - Т.12, № 5. - С.603-616.
17. *Боряев Ф.И., Голубниченко П.Г., Южаков В.С.* Из опыта эксплуатации сооружений Камской ГЭС // Гидротехническое строительство. - 1970. - № 1. - С. 5-9.
18. *Бучацкий Г.В., Зернов Е.В., Евдокимова Л.А., Сергеев В.И., Воронкевич С.Д.* Создание противofiltrационных завес с опытным применением нового химического тампонажного раствора // Гидротехническое строительство. - 1976. - № 4. - С.4-6.
19. *Быкова Е.Л., Никитина И.Б.* Взаимосвязь железа и кремния с органическим веществом в природных водах Южной Якутии // Геохимия. - 1966. - № 10. - С.1258-1261.
20. *Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С.* Физико-математические основы фильтрации воды. М.: Мир, 1971. - 452 с.
21. *Валяшко М.Г.* Роль растворимости в формировании химического состава природных вод // Докл. АН СССР. - 1954. - Т.99, № 4. - С.581-584.
22. *Вологодский Г.П.* Карст Иркутского амфитеатра, М.: Наука, 1975. - 124 с.
23. *Воронкевич С.Д.* Геолого-минералогические основы инъекционного закрепления пород: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. - М.: Изд-во МГУ, 1976. - 44 с.
24. *Воронкевич С.Д.* О техногенно-геохимических системах в инженерной геологии // Инженерная геология. - 1980. - №5. - С.3-13.
25. *Воронкевич С.Д., Морозов С.С., Сергеев Е.М.* Современные проблемы технической мелиорации грунтов // Матер. к пятому совещ. по закреплению и уплотнению грунтов. - Новосибирск, 1966. - С.96-107.
26. *Воронкевич С.Д., Бочко Э.А., Абрамова Т.Т., Федоров В.М.* Новые тампонажные растворы для закрепления пород при строительстве подземных сооружений. М.: Изд-во МГУ, 1971. - 70 с.
27. *Воронкевич С.Д., Евдокимова Л.А.* Газовая силикатизация пород. М.: Изд-во МГУ, 1974. - 148 с.
28. *Воронкевич С.Д., Евдокимова Л.А., Огородникова Е.Н.* Экспериментальные исследования формирования кремнеземистого цемента в песчаных отложениях // Генетические основы инж. геол.изуч. горных пород. - М.: Изд-во МГУ, 1975. - С.110-122.
29. *Воронкевич С.Д., Сергеев В.И.* Изменение физических свойств гелеобразующих растворов при инъекции // Гидротехническое строительство. - 1975. - № 4. - С.26-28.

30. *Воронкевич С.Д., Евдокимова Л.А., Сергеев В.И.* Теоретические основы и результаты внедрения способа химического тампонирувания полускальных и скальных пород // *Вопр. инженерной геологии и грунтоведения*: вып. 4. - М.: Изд-во МГУ, 1976. - С.199-209.
31. *Воронкевич С.Д., Голоднов В.М., Сергеев В.И., Шимко Т.Г.* Влияние сорбции на искусственное закрепление грунтов силикатными растворами // *Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве*. - М.: Стройиздат, 1978. - С.78-81.
32. *Воронкевич С.Д., Евдокимова Л.А., Злочевская Р.И. и др.* Техническая мелиорация пород. - М.: Изд-во МГУ, 1981. - 342 с.
33. *Воронкович С.Д., Емельянов С.Н., Максимович Н.Г. и др.* Химическое доуплотнение противифльтрационной завесы Камской ГЭС: Отчет. - М.: Изд-во МГУ, 1982. - Ч.2. - 123 с.
34. *Воронкевич С.Д., Евдокимова Л.А., Ларионова Н.А. и др.* Опыт применения инъекционного раствора на основе эпоксидной смолы для уплотнения скальных осадочных пород в районе створа Рогунской ГЭС // *Гидротехническое строительство*. - 1981. - № 10. - С.11-15.
35. *Воронкевич С.Д., Евдокимова Л.А., Ларионова Н.А.* Взаимодействие карбонатных минералов и гипса с компонентами щавелевоалюмосиликатных гелей // *Вопр. инженерной геологии и грунтоведения*. - М.: Изд-во МГУ, 1983. - Вып. 5. - С.370-382.
36. *Гельфер А.А.* Причины и формы разрушения гидротехнических сооружений. - М.; Л.: ОНТИ, 1936. - 320 с.
37. *Гениш Г.* Выращивание кристаллов в гелях. - М.: Мир, 1973. - 113 с.
38. *Геология оснований высоких плотин*. - М.: Госстройиздат, 1962. - 356 с.
39. *Гинзбург И.И., Рукавишников И.А.* Минералы древней коры выветривания Урала. - М.: 1955. - 716 с.
40. *Голубев В.С.* Динамика геохимических процессов. - М., 1981. - 208 с.
41. *Гончарова Л.В.* Основы искусственного улучшения грунтов. - М.: Изд-во МГУ, 1973. - 376 с.
42. *Гончарова Л.В., Зиангиров Р.С.* Опыт создания прочных противифльтрационных экранов из песков, укрепленных карбамидной смолой // *Вестн. Моск. ун-та. - Сер. геол.* - 1965. - № 6. - С. 65-74.
43. *Горбунова К.А.* Карст гипса СССР. - Пермь, 1977. - 84 с.
44. *Горбунова К.А.* Карст приустьевой части р.Чусовой // *Учен. зап. Перм. ун-та.* - 1956. - Т.10, вып.2. - С.59-70.
45. *Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г.* Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. - М.: Высшая школа, 1981. - 335 с.
46. *Давыдов В.В., Белоусов Ю.И.* Химический способ укрепления горных пород. - М.: Недра, 1977. - 228 с.

47. Данилова Н.А. Исследование связи между активностью, структурой и кислотностью магний-силикатных катализаторов // Тр. ин-та химии АН АзССР. – 1954. – Т.8. – С. 38-48.
48. Демин В. Ф., Попов Ю. Д., Аллас Э. Э. Опыт создания противотрационной завесы в карбонатных породах // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 1978. – Т.122. – С.81-85.
49. Денплес Э.К. Диагенез (и катагенез) песчаников // Диагенез и катагенез осадочных образований. – М.: Мир, 1971. С.92-120.
50. Дзеваньский Я., Комаров И.С., Молоков Л.А., Рейтер Ф. Инженерно-геологические исследования при гидротехническом строительстве. – М.: Недра, 1981. – 352 с.
51. Дмитриевский Г.Е., Мартынова Л.Г. и др. Растворимость кремнекислоты в растворах щелочей и карбонатов натрия и калия // Журн. прикладной химии. – 1971. – Т.44, № 2. С.2381-2386.
52. Добровольский Е.В., Лялько В.И. Некоторые особенности метасоматического замещения минералов // Математическое и физическое моделирование рудообразующих процессов. – М., 1978. – С.56-68.
53. Долгополов В.М., Голубниченко П.Г. и др. Некоторые итоги 20-летнего опыта эксплуатации Камской ГЭС // Гидротехническое строительство. – 1975. – № 4. – С.30-33.
54. Дуров С.А. Синтез в гидрохимии. – Ростов н/Д, 1961. – 248 с.
55. Дэнплс Э. Поведение кремнезема в диагенезе // Геохимия литогенеза. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – С. 234-258.
56. Емельянов С.Н. Инженерно-геологическая оценка и прогноз основных параметров химического инъекционного уплотнения скальных осадочных грунтов: дис. ... канд. геол.-мин. наук. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 197 с.
57. Ефимов А.И., Белорукова И.В. и др. Свойства неорганических соединений. – Л.: Химия, 1983. – 392 с.
58. Жданов С.П., Егорова Е.Н. Химия цеолитов. – Л.: Наука, 1968. – 160 с.
59. Жданов С.П., Хвощев С.С., Самулевич Н.Н. Синтетические цеолиты. – М.: Химия, 1981. – 264 с.
60. Жинью М., Барбье Р. Геология плотин и гидротехнических сооружений. – М.: Госстройиздат, 1961. – 256 с.
61. Завадская В.Ф., Лукьянова О.И., Пестунова Е.К. О двух областях гелеобразования силикатов натрия // Матер. 7-го Всес. совещания по закреплению и уплотнению грунтов. – Л.: Энергия, 1971. – С.174-177.
62. Зайцев Л.М. Поведение оксалатной группы в комплексных соединениях // Журн. неорганической химии. – 1964. – Т.9, вып. 10. – С.2375-2380.
63. Защитные пленки на солях. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1944.
64. Зверев В.П. Гидрохимические исследования системы гипс - подземные воды. – М.: Наука, 1967. – 100 с.

65. *Зверев В.П.* Роль подземных вод в миграции химических элементов. - М.: Недра, 1982. - 186 с.
66. *Зиангиров Р.С., Гончарова Л.В.* Уменьшение водопроницаемости песков карбамидной смолой // Вопр. инженерной геологии и грунтоведения. - М.: Изд-во МГУ, 1963. - Вып.1. - С.344-351.
67. *Зиангиров Р.С., Окина Н.А., Лаврова Н.А.* Изменение физико-механических свойств хвалынских глинистых пород под влиянием кислых техногенных вод // Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. - М.: Наука, 1982. - С.5-9.
68. *Злочевская Р.И., Волков Ф.Е., Воронкевич С.Д., Дивисилова В.И.* Закрепление глинистых и лессовых грунтов концентрированными растворами щелочей // Вопр. инженерной геологии и грунтоведения. - М.: Изд-во МГУ, 1983. - Вып. 5. - С.384-397.
69. *Золотарев Г.С.* Инженерная геодинамика. - М.: Изд-во МГУ, 1983. - 328 с.
70. *Казанский Ю.П.* Седиментология. - Новосибирск: Наука, 1976. - 271с.
71. *Казанский Ю.П., Казаринов В.П., Резанова Н.М.* Результаты экспериментов с насыщенными растворами кремнезема и их геологическое значение // Физические и химические процессы и фации. - М.: Наука. - 1968. - С. 77-79.
72. *Камбефор А.* Инъекция грунтов. - М.: Энергия, 1971. - 334 с.
73. *Каражанов Н.А.* О скорости растворения гипса и боратов при свободной конвекции // Тр. ин-та химических наук АН КазССР. - 1978. - Т 48. С. 58-64.
74. *Карпышев Е.С., Барановская Е.И.* Справочно-библиографический каталог по геологии оснований плотин. - М.: Энергия, 1967. - 124 с.
75. *Карпышев Е.С., Молоков Л.А., Нейштадт Л.И.* Инженерно-геологические изыскания для строительства гидротехнических сооружений. - М.: Энергия, 1980. - 344 с.
76. *Киракосов В.П., Бычков В.С.* Оценка эффективности цементации оснований гидротехнических сооружений по данным натурных наблюдений на примере Камского гидроузла // Матер. совещания по закреплению и уплотнению грунтов. - Тбилиси, 1964. - С. 404-412.
77. *Ковда В.А.* Основы учения о почвах. - М.: Наука, 1973. - Кн. 1. - 448 с; Кн. 2. - 468 с.
78. *Коломенский Е.Н., Кофф Г.Л.* О возможности палеогеографических реконструкций по результатам инженерно-геологических исследований строения грунтов // Инженерная геология, 1979. - № 3. - С. 44-48.
79. *Коржвинский Д.С.* Теория процессов минералообразования. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. - 24 с.
80. *Коржвинский Д.С.* Теория метасоматической зональности. - М.: Наука, 1969. - 111 с.

81. *Коробанова И.Г., Затенацкая Н.П.* О роли аморфного кремнезема в формировании инженерно-геологических свойств глинистых пород // Инженерно-геологические свойства глинистых пород и процессы в них. - М.: Изд-во МГУ, 1972. - С.26-36.
82. *Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Василькова И.В.* Прогнозирование химического состава подземных вод на основе машинного моделирования физико-химических взаимодействий в системе «вода-порода» // Междунар. геол. конгресс, 26 сессия: докл. советских геологов. Гидрогеология, инженерная геол. и строит. материалы. - М., 1980. - С.104-109.
83. *Краускопф К.Б.* Геохимия кремнезема в среде осадкообразования // Геохимия литогенеза. - М., Изд-во иностр. лит. 1983. - С. 210-233.
84. *Кузнецов А.М.* О выщелачивании гипса и ангидрита // Изв. Ест.-науч. ин-та при Пермском гос. ун-те. - Пермь, 1947. - Т.12, вып.4. - С. 127-134.
85. *Кузнецов А.М.* О волокнистом гипсе в Кунгурской толще Приуралья // Изв. Ест.-науч. ин-та при Пермском гос. ун-те. - Пермь, 1952. - Т.13, вып. 6. - С.503-518.
86. *Кузнецов А.М.* О газовых явлениях в основании плотин // Гидротехн. строительство. — 1965. - № 10. - С.33-37.
87. *Курчеико В.П., Беремжанов Б.А.* Растворимость солей в системе $\text{CaSO}_4 - \text{HCl} - \text{H}_2\text{O}$ при 25°C // Журн. неорганической химии. — 1976. - Т.21, №1. - С. 281-282.
88. *Кутергин В.Н.* Особенности взаимодействия некоторых типов песков и щавелевоалюмосиликатного раствора // Региональная геология некоторых районов СССР. - М.: Изд-во МГУ, 1976. - С.153-161.
89. *Лантев Ф.Ф.* Агрессивное действие воды на карбонатные породы, гипс и бетон. - М.; Л.: ГОНТИ, 1939. - 104 с.
90. *Лапухов А.С.* О диффузионном переносе вещества в трещинных полостях и сквозь межфазовое пространство водонасыщенных горных пород // Геология и геофизика. — 1966. - № 12. - С.56-66.
91. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика. - М.: Физматгиз, 1952. - 699 с.
92. *Левченко В.М.* О растворимости сульфата кальция // Гидрохимические материалы. - 1950. - Т.17. - С.69-73.
93. *Лодиз Р., Паркер Р.* Рост монокристаллов. - М.: Мир, 1974. - 540 с.
94. *Лукнер Л., Шестаков В.М.* Моделирование геофильтрации. - М.: Недра, 1976. - 407 с.
95. *Лыкошин А.Г., Молоков Л.А., Парабучев И.А.* Карст и строительство гидротехнических сооружений. - М.: Гидропроект, 1992. - 324 с.
96. *Максимович Г.А., Горбунова К.А.* Карст Пермской области. - Пермь, 1958. - 180 с.
97. *Максимович Г.А.* Основы карстоведения. - Пермь, 1983. - Т.1. - 444 с.

98. *Маменко Г.К.* Камская плотина на р.Каме // Геология и плотины. - М.: Энергия, 1967. - Т.5. - С.9-39.
99. *Маменко Г.К.* Изучение сохранности гипсоносных пород в основании Камской гидроэлектростанции. Гидротехническое строительство. - 1969. - № 5. - С.16-21.
100. *Манукян А.В., Ржаницин Б.А.* Возможность химического закрепления белоземов АрмССР // Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве. - М.: Стройиздат, 1983. - С.88-89.
101. *Маслов Н.Н., Науменко В.Г.* Условия устойчивости напорных сооружений на загипсованных породах // Растворение и выщелачивание горных пород. - М.: Госстройиздат, 1957. - С.71-81.
102. *Матвеева Л.А., Васильева Л.А. и др.* Влияние почвенных органических кислот на поведение алюминия в разбавленных растворах // Кора выветривания. - М.: Наука, 1978. - Вып. 16. - С.212-229.
103. *Митчелл Э.Р., Уэйт Р.* Метод конечных элементов для уравнений с частными производными. - М.: Мир, 1981. - 216 с.
104. *Мицюк Б.М.* Механизм растворения кремнезема и извлечения его из растворов в природных условиях // Геохимия. - 1972. - № 9. - С. 1133-1135.
105. *Мицюк Б.М.* Взаимодействие кремнезема с водой в гидротермальных условиях. - Киев: Наукова думка, 1974. - 87 с.
106. *Молоков Л.А.* Опыт изучения области взаимодействия сооружений и геологической среды // Инженерная геология. - 1982. - № 3. - С.14-25.
107. *Морозов С.С., Дьячкова Н.Г.* Зависимость прочности песков, закрепленных растворами карбамидных смол, от введения в них минералов разного состава и дисперсности // Матер. к пятому совещанию по закреплению и уплотнению грунтов. - Новосибирск, 1966. - С.616-620.
108. *Мулюков Э.И.* О закреплении грунтов карбамидными смолами // Тр. НИИ промышленного строительства. - 1976. - Вып. 17. - С.82-92.
109. *Мур Д.* Противофильтрационные мероприятия на плотине Коунас-Форд // Гражданское строительство. - 1965. - № 6. - С.11-16.
110. *Неймарк И.Е.* Силикагель, свойства, применение и методы получения. Успехи химии. - 1956. - Т.26, вып.6. - С.748-769.
111. Объяснительная записка к унифицированным и корреляционным стратиграфическим схемам Урала. - Свердловск, 1980. - Ч. II. - 134 с.
112. *Огильви А.А.* Одна из возможных причин связи карстовых явлений с тектоническими зонами // Тез. докл. совещания по карсту. - М., 1956. - Т.7. - С.9-13.
113. *Огородникова Е.Н.* Влияние железистых пленок при укреплении минералов карбамидной смолой // Матер. 7-го Всес. совещания по закреплению и уплотнению грунтов. - Л.: Энергия, 1971. - С.319-321.

114. *Окамото Г., Окура Т., Гото К.* Свойства кремнезема в воде // Геохимия литогенеза. - М.: Изд-во иностр. лит., 1963. - С. 196-209.
115. *Орадовская А.Е.* Фильтрационное выщелачивание дисперсно распыленного гипса из песчано-глинистых пород // Растворение и выщелачивание горных пород. - М.: Госстройиздат, 1962. - С. 26-34.
116. *Орадовская А.Е.* Разгрузка минерализованных вод, как фактор защиты основания плотины от растворения // Научные сообщения ВОД-ГЕО. Гидрогеология. - М.: Госстройиздат, 1962. - С. 26-34.
117. *Осипов В.И., Соколов В.Н.* Подготовка образцов глин для микроструктурных исследований // Матер. 2-го Всес. совещания по изучению и использованию глин и глинистых минералов. - М.: Наука, 1976. - С. 211-212.
118. *Петровский М.Б., Сергеева Н.С.* Контроль фильтрационных расходов через тело и основание бетонной плотины Красноярской ГЭС // Гидротехническое строительство. - 1976. - №12. - С. 27-33.
119. *Писарчик Я.К.* Гипсы и ангидриды // Справочное руководство по петрографии осадочных пород. - Л.: Гостоптехиздат, 1958. - Т 2, гл. 12. - С. 321-343.
120. *Питвева К.Е., Альшинский В.С., Ковалевская С.А.* К вопросу о влиянии физико-химических процессов на проницаемость пород // Методы оценки ресурсов подземных вод: Симпозиум Международной ассоциации гидрогеологов. - М.: 1979. - Т. 15. - С. 212.
121. *Плачинда А.С., Чертов В.М., Наймарк И.В.* Адсорбционные свойства Са-замещенных силикагелей // Укр. химический журн. — 1966. - Т.32, вып. 4. - С. 315-321.
122. *Понизовский А.А., Пачепский Я.А.* Определение растворимости гипса в пятикомпонентной водно-солевой системе Са, Mg, Na, Cl, $\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ при 25°C расчетным методом // Журн. неорганической химии. — 1979. - Т. 24, № 1. - С. 161-167.
123. *Попов И.В.* Инженерная геология. - М.: Изд-во МГУ, 1959. - 510 с.
124. *Прочухан Д.П.* Проблема растворимости гипса в гидротехническом строительстве // Докл. на науч. совещании по изучению карста. - М.: 1956. - Вып.7. - С.16-19.
125. *Прочухан Д.П., Ломтадзе А.М., Натис Н.А.* Инженерно-геологические условия сооружений Камской ГЭС // 15 лет Ленингр. отделения «Гидропроект»: Информ. сб. - Л.: Гидропроект, 1959.
126. *Ржаницин Б.А.* Силикатизация песчаных грунтов. - М.: Машстройиздат. 1949. - 143 с.
127. *Ржаницин Б.А., Сергеев В.И., Степанова Е.В.* Физико-химическая устойчивость алюмосиликата в теле противифильтрационной завесы высотной Асуанской плотины // Матер. 7-го Всес. совещания по закреплению и уплотнению грунтов. - Л.: Энергия, 1971. - С.167-171.

128. *Родионов Н.В.* Инженерно-геологические исследования в карстовых районах. - М.: Гостоптехиздат, 1954. - 184 с.
129. *Розовский А.Я.* Кинетика топохимических реакций. - М.: Химия, 1974. - 224 с.
130. *Рыженко Б.Н., Хитаров Н.И.* К вопросу о форме кремнезема в водных растворах // Геохимия. - 1968. - № 8 - С.957-961.
131. *Семенов В.В., Шеварина Н.Н.* Приложение метода конечных элементов к расчету фильтрации в основании гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. - 1976. - № 4. - С.8-10.
132. *Семенов В.В., Ухов С.Б., Шеварина Н.Н.* Расчет напорной фильтрации в основании гидротехнических сооружений методом конечных элементов // Вопр. механики грунтов оснований и фундаментов: Тр. МИСИ. - М.: Изд-во МИСИ, 1977. - № 140. - С.150-160.
133. *Сергеев В.И.* Инженерно-геологические особенности создания противофильтрационных завес в аллювиальных отложениях: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. - М.: 1973. - 23 с.
134. *Сергеев В.И., Воронкевич С.Д., Абрамова Т.Т.* Влияние поровых вод на параметры инъецируемого раствора и физико-механические свойства искусственно закрепленных грунтов // Влияние поровых вод на физико-механические свойства пород. - Киев: Наукова думка, 1974. - С.263-269.
135. *Сергеев В.И., Евдокимова Д.А., Воронкевич С.Д.* К вопросу о контроле интенсивности растворения гипса в основании Камской ГЭС // Карст Нечерноземья: тез. докл. Всес. науч.-техн. совещания. - Пермь, 1980. - С.87-88.
136. *Сергеев В.И., Емельянов С.Н.* Некоторые особенности закрепления скальных грунтов основания Камской ГЭС // Инженерная геология. - 1980. - № 1. - С.113-117.
137. *Сергеев В.И., Тейшова И.П.* Исследования диффузии компонентов геля щавелевоалюмосиликатного раствора при инъекционном уплотнении грунтов // Инженерная геология Зап. Урала: тез. докл. науч.-техн. совещания. - Пермь, 1982. - С.91-92.
138. *Сергеев Е.М.* О необходимости изучения химико-минералогического состава грунтов при их закреплении // Совещание по закреплению грунтов. - Рига, 1959. - С.128-130.
139. *Сергеев Е.М.* Инженерная геология. - М.: Изд-во МГУ, 1978. - 384с.
140. *Сергеев Е.М., Мельникова К.П.* Идеи В.И. Вернадского о ноосфере и дальнейшее развитие инженерной геологии // Вестн. МГУ. - Сер. геол. - 1963. - № I. - С.43-47.
141. *Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С. и др..* Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 1983. - 392 с.
142. *Скарченко В.К.* Алюмосиликатные катализаторы. - Киев, 1963. - 120 с.

143. *Слиякова И.Б., Неймарк И.Е.* Структура и адсорбционные свойства силикагелей, полученных из щелочных сред // Коллоид. журн. - 1958. - Т.20, № 1. - С.84-91.
144. *Соколова Е.И., Листова Л.П., Вайнштейн А.З.* Ферросиликатные и ферросиликатные сульфатные и хлоридные системы равновесия // Тр. геол. ин-та. - 1956. - Вып.3. - 68 с.
145. *Соколова О.В., Доливо-Добровольский В.В.* О взаимодействии апатита с растворами серной кислоты низких концентраций // Физико-химические и математические методы в технологии: Записки ленингр. горного ин-та. - Л., 1970. - Т.50, вып. 3. - С.43-47.
146. *Соколович В.Е.* Роль гипса в процессе закрепления грунтов силикатизацией // Матер. совещания по закреплению и уплотнению грунтов. - Тбилиси, 1964. - С.44-51.
147. *Соколович В.Е.* О химической устойчивости глинисто-силикатных тампонажных гелей // Матер. к 5-му совещанию по закреплению и уплотнению грунтов. - Новосибирск, 1966. - С.546-549.
148. *Соколович В.Е.* Участие природной кремневой кислоты в процессах химического закрепления грунтов // Матер. к 6-му Всес. совещанию по закреплению и уплотнению грунтов. - М.: Изд-во МГУ, 1968. - С.392-394.
149. *Соколович В.Е.* Химическое закрепление грунтов. - М.: Стройиздат, 1980. - 119 с.
150. *Соколович В.Е., Вебер И.Б.* Интенсификация силикатизации лессовых грунтов в аммиачно-силикатном растворе // Матер. к 5-му совещанию по закреплению и уплотнению грунтов. - Новосибирск, 1966. - С.335-337.
151. *Степанова Е.В.* Закрепление сильно загипсованных водопроницаемых грунтов // Матер. к 6-му Всес. совещанию по закреплению и уплотнению грунтов. - М.: Изд-во МГУ, 1968. - С.315-318.
152. *Страхов Н.М.* О некоторых вопросах геохимии кремнезема // Геохимия кремнезема. - М.: Наука, 1966. - С.5-8.
153. *Твенхофел У.Х.* Учение об образовании осадков. - М.; Л.: ОНТИ НКТП, 1936. - 916 с.
154. *Терлецкая М.Н.* К вопросу суффозионной устойчивости засоленных гипсом грунтов в гидротехнических сооружениях // Растворение и выщелачивание горных пород. - М.: Госстройиздат, 1957. - С.161-174.
155. *Терцаги К.* Инженерная геология. - М.; Л.: Новосибирск: ОНТИ НКТП, 1934.- 444 с.
156. *Трупаков Н.Г.* Замораживание грунтов в гидротехническом строительстве // Совещ. по закреплению грунтов и горных пород. - М.: Изд-во АН СССР, 1941. - С.81-96.

157. *Турцев А.А.* Трешиноватость пермских отложений участка строительства Камской гидростанции // Тр. Петрограф. ин-та. - 1938. - Вып.12. - С.173-202.
158. *Турцев А.А.* Растворимость под давлением загипсованных пород. - Тр. Петрограф. ин-та, 1938. - Вып.12. - С.175-196.
159. *Ферсман А.Е.* Явление диффузии в земной коре // Природа. - 1913. - № 7-8. - С.818-826.
160. *Френкель Б.А.* Автоматизация экспериментальных установок. - М.: Химия, 1980. - 368 с.
161. *Чаликова Е.С.* Долговечность песков закрепленных карбамидной смолой // Матер. к 6-му Всес. совещанию по закреплению и уплотнению грунтов. - М.: Изд-во МГУ, 1968. - С.407-410.
162. *Чаликова Е.С.* Долговечность силикатированного лёсса // Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве. - Киев: Будивельник, 1974. - С.160-163.
163. *Чаликова Е.С., Степанова Е.В.* Долговечность силикатных тампонажных растворов // Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве. - Киев, Будивельник, 1974. - С.163-165.
164. *Черкинский Ю.С.* Химия полимерных неорганических вяжущих веществ. - Л.: Химия, 1967. - 224 с.
165. *Черкинский Ю.С., Князькова И.С.* О реакционной способности комплексного кремнекислородного катиона в водном растворе // Докл. АН СССР. - 1973. - Т.212, № 3. - С.647-648.
166. *Чернышев С.Н.* Движение воды по сетям трещин. - М.: Недра, 1979. - 144 с.
167. *Чувелев В.К.* О синерезисе геля карбамидной смолы в капиллярно-порovém пространстве // Матер. к 6-му Всес. совещанию по закреплению и уплотнению грунтов. - М.: Изд-во МГУ, 1968. - С. 404-405.
168. *Чугаев Р.Р.* Гидравлика. - Л., Энергоиздат, 1982. - 672 с.
169. *Чухров Ф.В.* Коллоиды в земной коре. - М.: Изд-во АН СССР, 1955. - 672 с.
170. *Шестаков В.М.* Динамика подземных вод. - М.: Изд-во МГУ, 1979. - 367 с.
171. *Шимко Т.Г.* Влияние состава и структуры лессовых грунтов на инъекционный процесс при их силикатизации: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. - М.: Изд-во МГУ, 1982. - 21 с.
172. *Штернина Э.Б.* Растворимость гипса в водных растворах солей // Изв. сектора физ.-хим. анализа ин-та общей и неорган. химии АН СССР. - 1949. - Т. 17.
173. *Элердашвили С.И.* Гидрогеология и инженерная геология Ирака. - М.: Недра, 1973. - 349 с.
174. *Эйтель В.* Физическая химия силикатов. - М.: Изд-во иностр. лит., 1962. - 1056 с.

175. *Bandyopadhyay T.* Growth of calcite in gels // Indian J. Earth Sciences. – 1977. – vol. 4, № 1. – P.95-99.
176. *Breish R.L., Meador J.T.* The Brantley dam project // NSS News. – 1973. – Vol. 31, № 9. – P.169-172.
177. *Brune G.* Anhydrite and gypsum problems in engineering geology // Ass. Eng. Geol. – 1965. – № 2 – P.26-33.
178. *Calvino F., Costantino F., Mirri F.* Design criteria for a dam, reservoir and irrigation system on a middle east evaporate formation // Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. – 1981 – № 24. – P.53-55.
179. *Christoffersen J., Christoffersen M.R.* The kinetics of dissolution of calcium sulphate dihydrate in water // J. Cryst. Growth. – 1976. – Vol.35, № 1. – P.79-88.
180. *Cole W.F., Lancucki C.J.* A refinement of the crystal structure of gypsum $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ // Acta crystallogr. – b.30, № 4. – P.921-929.
181. *Frohlich F.* Neoformation de silicates ferrires amorphes dans la sedimentation pelagique recente. – Bull. Miner. – 1980. – Vol. 103, № 6. – P.798.
182. *Gardner G.L., Nancollas G.H.* Kinetics of dissolution of calcium oxalate monohydrate // J. Phys. Chem. – 1975. – Vol.79, № 24. – P.2597-2600.
183. *Gorbunova K.A., Maximovich N.G.* Types of karst water discharge in gypsum-anhydrite karst regions // Europ. conf. of speleology. – Sofia, 1980. – P.34.
184. *James A.N., Lupton A.R.R.* Gypsum and anhydrite in foundations of hydraulic structures // Geotechnique. – 1978. – Vol.28, № 3. – P.249-272.
185. *James A.N., Kirkpatrick I.M.* Design of foundations of dams containing soluble rocks and soils // Quart. J. Eng. Geol. – 1980. – Vol.13, № 3. – P.189-198.
186. *Kirsch K., Samol H.* Injektionsverfahren zur Baugrundverbesserung // Tiefbau - Ingenieurbau – Strassenbau. – 1978. – Vol.20, № 12. – P.919-925.
187. *Liu Jiakai et al.* Polyurethane grouting in hydraulic engineering // Grouting in Geotechnical Engineering. – N.J., 1982. – P.403-417.
188. *McCavley J.W., Roy R.* Controlled nucleation and crystal growth of various CaCO_3 phases by the silica gel technique // Amer. Miner. – 1974. – Vol.59. – P.947-967.
189. *Molokov L.A., Paraboutchev I.A.* Experience d'etudes geologiques en URSS pour la construction des ouvrages hydrauliques sur les roches solubles // Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. – 1981. – № 24. – P.69-73.
190. *Muljukow E.I.* Über den Stand und die Entwicklungsaussichten der chemischen Bodenverfestigung // Osterr. Ing. - Z. – 1979. – Vol.22, № 2. – P.41-45.
191. *Nobukazu I.* Выращивание кристаллов гипса из гелей // Сэкко то сэкай. – 1978. – № 153. – С.75-80 (япон.).
192. *Osende J., De Porcellinis P.* Deux problemes dans le traitement de sols avec injections de gel de silice // 6th Eur. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Proc. – Wien, 1976. – Vol.11, – P.257-260.

193. *Poupelloz B., Toulemont M.* Stabilisation des terrains karstiques par injections. Le cas du lutetien Gypseux de le region de Paris // Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. - 1981. - № 24. - P.111-123.
194. *Ricketts B.D.* Experimental investigation of carbonate precipitation in hydrated silica gel // J. Siment. Petrol. - 1980. - Vol.50, № 3. - P.963-970.
195. *Rosmalen G.M. van, Marchee W.G.J., Bennema P.A.* A comparison of gypsum crystals grown in silica gel agar in the presence of additives // J.Cryst. Growth. - 1976. - Vol.35, № 2. - P.169-176.
196. *Tornaghi R.* Consolidamento di terreni e rosse in posto. Iniezioni : campi di applicabilita e indagini pre liminari sui mezzida trattare // Strade e Traffico. - 1978. - Vol.25, № 266. - P.42-58.

ПУБЛИКАЦИИ В РАЗВИТИЕ ПРОБЛЕМЫ

Проблема обеспечения безопасности плотин на растворимых породах получила развитие в некоторых публикациях, которые автор счел уместным привести полностью.

И.Н. Болотина, С.Д. Воронкевич, Н.Г. Максимович

О ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОГЕННЫХ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ СИЛИКАТИЗАЦИИ ГИПСОНОСНЫХ ПОРОД

(Вестник Московского университета. — Серия 4. Геология. - 1986.- № 4. - С.49-53)

Широкое применение химических инъекционных растворов для закрепления и уплотнения пород при строительстве инженерных сооружений обуславливает необходимость изучения процессов, происходящих и образующихся при этом техногенно-геохимических системах [3]. В продолжение работ, проведенных по изучению постинъекционных процессов при доуплотнении противифльтрационной завесы Камской ГЭС [7], были выполнены микробиологические исследования.

О присутствии значительных количеств микроорганизмов в грунтах свидетельствуют данные ряда авторов [1, 2, 9], с подземными водами они проникают на глубину до нескольких километров [4]. Микроорганизмы способны осуществлять многие процессы, которые не могут происходить химическим путем, оказывая тем самым влияние на основные физико-химические параметры среды. Наиболее заметно деятельность микроорганизмов проявляется в местах с повышенным содержанием органических веществ, микробиологическое разложение которых ведет к обильному выделению газов, накоплению продуктов неполного разложения органики и др. О протекании подобных процессов при строительстве инженерных сооружений свидетельствуют, в частности, данные А. М. Кузнецова [6] об обильном выделении газов (CH_4 , H_2S , CO_2 , H_2 и др.) после сооружения плотины Камской ГЭС. Источниками органического вещества для микробиологического образования газов в основании плотины являлись: органическое вещество пород; богатые органикой воды, фильтрующиеся из водохранилища; гидроизоляция подземных сооружений, представляющая собой мешковину, пропитанную битумом, и др. Начатое в 1974 г. доуплотнение цементационной завесы щавелевоалюмосиликатным (ЩАС) гелем, имеющим в своем составе производные органической кислоты, создало дополнительный источник питания для микроорганизмов. В связи с этим

проведены исследования для оценки принципиальной возможности проявления биогеохимических процессов в условиях формирующихся техногенно-геохимических систем.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования являлись природные воды и ЩАС геля, приготовленный в лабораторных условиях. Пробы воды были отобраны из трех пьезометрических скважин в основании Камской ГЭС и имели различный химический состав и минерализацию: из скв. 225 б — сульфатно-натриевые 2,5 г/л; из скв. 248 — сульфатно-натриевые 5,5 г/л; из скв. 118 — хлоридно-натриевые 33,6 г/л. Температура вод 7–8 °С, значения водородного показателя после создания завесы 7,2–8,0. Из проб производилось выделение микроорганизмов методом предельных разведений на среду Виноградского для сульфатредуцирующих бактерий в модификации Кочкиной и методом высева из разведений на агаризованный грунт [8].

Среда Виноградского имеет следующий состав (г/л): K_2HPO_4 — 0,05; MgSO_4 — 2,5; NaCl — 2,5; FeSO_4 — 0,05; MnSO_4 — 0,05; бумага фильтровальная, измельченная на тканеизмельчителе — 2,5; pH 7,2. Агаризованный грунт готовили из загипсованного лёссового грунта, отношение грунт: водопроводная вода — 1:5, агар-агар — 2%.

Приготовление образцов ЩАС геля для лабораторных исследований проводили при соотношении силиката натрия и отвердителя, соответствующих применяемым при инъекции в основании Камской ГЭС (100:46). Раствор готовили из двух составляющих: силиката натрия плотностью 1,19 г/см³ и отвердителя, представляющего собой водный раствор сернокислого алюминия (50 г/л) и щавелевой кислоты (50 г/л). Приготовленный раствор, имеющий pH 11,1–11,6, заливали в чашки Петри и через 1,5 ч после образования геля отмывали дистиллированной водой до значений водородного показателя промывочного раствора, близких к нейтральным. Отмывка производилась для придания интермицеллярной жидкости геля значений pH, реально существующих в массиве. Были поставлены следующие варианты опытов.

Вариант 1. На поверхность геля в чашке Петри насыпали тонкий слой порошка гипса, отобранного из скважин в основании Камской ГЭС. Затем в чашку добавляли воду из скв. 118, содержащую микроорганизмы. Вода имела следующий химический состав: Ca^{2+} — 2; Mg^{2+} — 0,8; Na^{+} — 9,8; Cl^{-} — 13,4; SO_4^{2-} — 8,4; HCO_3^{-} — 0,01; CO_3^{2-} — 0,002 г/л.

Вариант 2. Кроме порошка гипса поверхность геля покрывали слоем фильтровальной бумаги, являющейся источником органического питания для микроорганизмов, и заливали суспензией культуры сульфатредуцирующих бактерий, выделенных из подземных вод Камской ГЭС.

Вариант 3. Ингредиенты те же, что в варианте 2, но в качестве микробной культуры использовали активный штамм сульфатредуцирующих бактерий, выделенный из почвы.

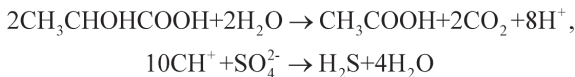
Внесение гипса во все варианты опытов обусловлено тем, что в закрепляемых породах основания плотины Камской ГЭС содержится значительное количество гипса, который может служить акцептором электронов при получении энергии сульфатредуцирующими бактериями. Чашки Петри с образцами выдерживали в анаэроостате в течение 10 месяцев. Затем производили исследование геля на сканирующем электронном микроскопе КВИКСKAN-107 и на рентгеновском дифрактометре ДРОН-0,5. Электронно-микроскопическое изучение проводили после замораживания образцов геля в жидком азоте и сублимационной сушки в вакууме.

Результаты исследований и их обсуждение. Применение в качестве питательных сред агаризованного грунта и среды Виноградского показало, что в водах основания Камской ГЭС содержится значительное количество микроорганизмов, в том числе сульфатредукторы, бактерии, окисляющие Fe и Mn, неспоровые пигментированные и бесцветные бактерии, количество которых достигает 10^3 клеток/мл. Часть из этих микроорганизмов способна развиваться, используя компоненты ЩАС геля.

В условиях, наиболее приближенных к природным (вариант 1), бактерии, содержащиеся в воде из скв. 118, образовали колонии как на поверхности геля, так и внутри него, вплоть до дна чашки. При этом примерно одна треть объема геля, имеющего белый цвет, приобрела темную окраску и сильный запах H_2S . Темная окраска обусловлена отложением сульфидов, образующихся в результате взаимодействия сероводорода, с металлами, содержащимися в среде, и в первую очередь с железом. Гладкая поверхность геля стала шероховатой. Микробиологический посев из почерневших участков геля и их электронно-микроскопическое изучение свидетельствовали о микробном происхождении отложений черного цвета и о принадлежности этих организмов к группе сульфатредуцирующих бактерий. Полученные результаты и отчетливый запах сероводорода подземных вод изучаемых участков Камской ГЭС, а также имеющийся в них черный осадок сульфидов явились основанием для особого внимания при изучении этой группы микроорганизмов.

С деятельностью сульфатредуцирующих бактерий уже с конца прошлого века связывают процессы восстановления сульфатов, образование сероводорода и серы в биосфере. Восстановление сульфатов способны осуществлять многие факультативные анаэробы. Способность использовать сульфаты в качестве конечного акцептора электронов с образованием больших количеств сероводорода присуща лишь высокоспециализированной группе микроорганизмов — облигатно анаэробным сульфатредукторам, к которым относятся гетеротрофные бактерии родов *Desulfovibrio* и *Desulfotomaculum*, а также некоторые другие обнаруженные в последнее время организмы [5]. В анаэробных условиях или при ограниченном дос-

тупе воздуха в процессе жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий органические вещества (углеводы, органические кислоты) подвергаются дегидрогенизации, водород переносится на сульфаты, сульфиты или тиосульфаты, которые восстанавливаются в сероводород. При этом образуются уксусная кислота и сероводород:



Микроорганизмы могут образовывать сероводород и без разложения органических веществ, получая энергию для развития при окислении газообразного водорода и используя сульфаты в качестве акцептора водорода:



Образующийся сероводород активно взаимодействует как с твердой фазой грунта, так и с имеющимися в жидкой фазе катионами. Он осаждается и выделяется в виде нерастворимых сульфидов металлов, например FeS, что может существенно повлиять на свойства грунта.

Чтобы ускорить происходящие в природе процессы микробиологического восстановления сульфатов с образованием сероводорода, нами были созданы условия, способствующие активной жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий. С этой целью были внесены дополнительные источники органического питания (фильтровальная бумага), минерального питания (минеральные соли) и энергии (гипс). В этих условиях развитие сульфатредукторов и образование сульфидов происходили наиболее интенсивно (варианты 2 и 3), особенно при использовании коллекционного штамма. В последнем случае (вариант 3) гель потерял упругость, приобрел черную окраску и сильный запах сероводорода; покрывающий гель лист фильтровальной бумаги был сильно изъеден, его поверхность уменьшилась на 1/3. Рентгенометрическое изучение почерневших участков геля, подвергшихся наибольшему изменению, показало отсутствие в них кристаллической фазы.

Электронно-микроскопическое изучение образцов вариантов 2 и 3 показало значительную неоднородность геля в местах развития микроорганизмов: относительно неизменные участки (рис. 1, а) чередовались с участками, содержащими дополнительный биогенный компонент (рис. 1, б-г), количество которого было больше в варианте 3. В основном это нитевидные структуры, покрытые аморфными отложениями (рис. 1, г). Более молодые клетки не имеют толстого чехла (рис. 2). Изучение образцов геля варианта 1, условия в котором были максимально приближены к природным, не выявило заметных отличий в структуре геля по сравнению с исходными.

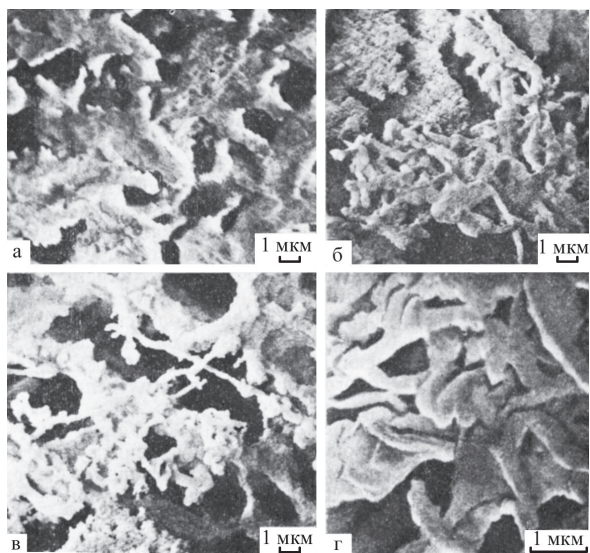


Рис. 1. Щавелевоалюмосиликатный гель, подвергнутый микробиологическому воздействию: а — неизменный участок; б-г — биогенный компонент в структуре геля

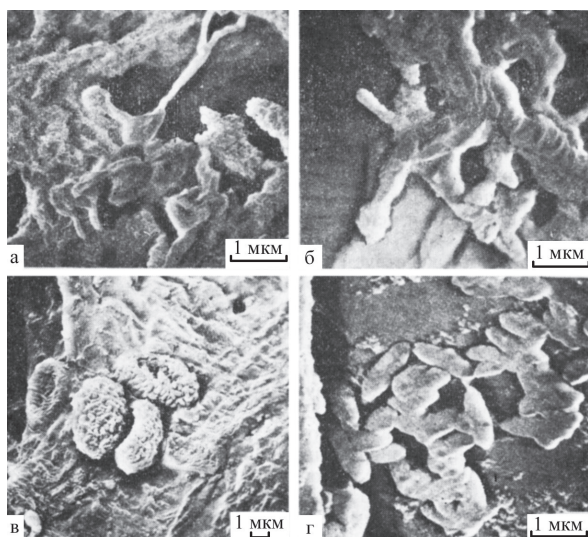


Рис. 2. Клетки микроорганизмов в системе ЩАС—гипс—вода

Таким образом, формирование и эволюция специфической техногенно-геохимической обстановки в результате инъекции гелеобразующих растворов, содержащих органическое соединение, в определенных условиях (в данном случае в присутствии гипса) могут оказаться благоприятными для возникновения и развития соответствующих биогеохимических процессов. Для оценки инженерно-геологического значения обнаруженного авторами явления, и в частности его влияния на характер и интенсивность постинъекционных процессов, определяющих наиболее существенные физико-механические и фильтрационные свойства системы, требуются дополнительные лабораторные исследования и натурные наблюдения.

Список литературы

1. Болотина И.Н., Минервин А.В., Усупаев Ш.Э. Микроорганизмы лёссовых пород // Инженерная геология 1983. № 5. С. 47-54.
2. Болотина И.Н., Хлебникова Г.М. Распространение микроорганизмов в некоторых грунтах // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. М., 1983. Вып. 5. С. 59-68.
3. Воронкевич С.Д. О техногенно-геохимических системах в инженерной геологии // Инженерная геология 1980. № 5. С. 3-13.
4. Гуревич Н.С. Роль микроорганизмов в формировании химического состава подземных вод // Тр. Ин-та микробиологии АН СССР. М., 1961. Вып. 9. С. 86-100.
5. Кондратьева Е.Н. Химолитотрофы и метилотрофы. М.: Изд-во МГУ, 1983.
6. Кузнецов А.М. О газовых явлениях в основании бетонных плотин // Гидротехническое строительство. 1964. № 10. С. 33-37.
7. Максимович Н.Г., Воронкевич С.Д. Взаимодействие алюмосиликатных гелей с минерализованными водами и его инженерно-геологическое значение // Вестн. Моск. ун-та. Сер. геол. 1983. № 4. С. 78-87.
8. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во МГУ, 1980.
9. Мехтиева В.Л. Распространение микроорганизмов в современных и древних глинисто-алевритовых осадках // Тр. Ин-та микробиологии АН СССР. Вып. 9. М., 1961. С. 25-32.

**С.Д. Воронкевич, С.Н. Емельянов, С.В. Морозов,
Н.Г. Максимович**

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ КАЧЕСТВА ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЗАВЕС В СКАЛЬНЫХ РАСТВОРИМЫХ ГРУНТАХ

(Энергетическое строительство. - 1987. - № 7. - С.15-18)

По мере дальнейшего освоения гидроэнергетического потенциала все чаще возникает необходимость возведения крупных гидроэнергетических сооружений в неблагоприятных инженерно-геологических условиях, в том числе на скальных растворимых грунтах, к которым относятся грунты, имеющие в своем составе гипс, каменную соль, сильвин. Обеспечение надежности гидросооружений на таких основаниях приобретает особую актуальность.

Как показывает зарубежный опыт, при строительстве на таких основаниях плотин без выполнения каких-либо мероприятий по защите пород от растворения в процессе эксплуатации в основании образуются полости, что может привести к разрушению сооружения (плотина Сен-Френсис высотой 63 м, США). Вместе с тем более чем 30-летний период эксплуатации Камской ГЭС свидетельствует о возможности возведения плотин на растворимых скальных грунтах. В настоящее время на таких грунтах строятся плотина Рогунской ГЭС и Нижне-Каферниганская плотина [1, 2].

Одним из наиболее распространенных противофильтрационных мероприятий в основании плотин являются завесы. Для обеспечения защиты гипсов и солей от растворения завесы должны обладать высокой плотностью. Новый эффективный способ создания таких завес — поэтапная инъекция цементных и химических растворов. В таблице приведены примеры применения химических растворов для создания высокоплотных противофильтрационных завес в основании плотин.

Однако достигнутое высокое качество противофильтрационных завес снижается со временем в результате различных физико-химических процессов, протекающих в закрепленном массиве между инъецируемыми растворами, их компонентами и продуктами искусственной цементации, с одной стороны, и породами и подземными водами — с другой. Эти постинъекционные процессы отражаются на фильтрационных параметрах завес и окружающих их пород. Прогноз количественных изменений свойств противофильтрационных завес приобретает все большее значение, как для проектирования их конструкций, так и для организации работы эксплуатационных служб, которые могут более целенаправленно проводить контроль и планировать реставрацию завес.

Примеры применения химических растворов для создания высокоплотных противοфилтрационных завес в основании плотин

Гидроузел (страна)	Литологические типы пород основания	Применяемые растворы	Удельное водопоглощение, л/мин	Причины применения химических растворов	Литера- турный источник
Камская ГЭС (СССР)	Мергели, доломиты, гипсы, ангидриты, известняки, аргиллиты, алевролиты	Шавелевоалю- мосиликатный	0,005	Снижение эффективности цементационной завесы	[3]
Перепадная ГЭС-1* (СССР)	Песчаники, глины, конгломераты	То же На основе ФРЭС	0,004 0,016	Наличие тонко трещиноватых пород, не поддающихся цементации	[4] [5]
Рогунская ГЭС* (СССР)	Аргиллиты, алевролиты, песчаники, гипс, каменная соль	На основе эпоксидной смолы ТЭГ-1	0,007	Создание высокоплотного экрана для защиты пласта соли	[6]
Коунас- Форд (США)	Граниты	То же АМ-9	Около 0	Недостаточная плотность цементационной завесы	[7]
Кайнджи (Нигерия)	Граниты и алевролиты	На основе резорциноформаль- дегидной смолы	-	То же	[8]
Бу- Ханифия (Алжир)	Песчаники, пески, глины	На основе силиката натрия	-	Неэффективность цементации	[9]
Гриб (Алжир)	Мергели, песчаники	То же	Снижено на 99,6%	То же	[9]
Фодда (Алжир)	Известняки	Силикат натрия и серноокислый алюминий	-	Наличие тонко трещиноватых пород	[9]
Фентган (КНР)	Песчаники	На основе полиуретана	-	Необходимость повышения качества цементационной завесы	[10]
Ченшун (КНР)	Брекчии и меланиты	То же	-	То же	[10]

*На этих ГЭС проведены опытные работы

В проблемной лаборатории геологического факультета МГУ в течение ряда лет проводились систематические исследования постинъекционных процессов и их влияния на проницаемость противοфилтрационных завес. Экспериментально-теоретические исследования и натурные наблюдения были направлены на решение следующих основных задач:

- изучение механизма, кинетики и динамики взаимодействия раство-

римой составляющей пород (в частности, гипсов) с постинъекционными растворами;

- определение изменения во времени водопроницаемости скальных грунтов (как в естественном состоянии, так и уплотненных цементными и химическими гелеобразующими растворами);
- разработку критериев для количественных оценок влияния формирования и развития во времени техногенно-геохимических процессов на фильтрационные параметры пород и завесы.

Для решения этих задач были выбраны условия Камской и Рогунской ГЭС. Разносторонний опыт, накопленный в ходе исследований, послужил основой для разработки общих принципов методики оценки изменения качества противofильтрационных завес в скальных растворимых грунтах, которая состоит из нескольких основных этапов (рис. 1).



Рис. 1. Основные этапы методики оценки изменения качества противofильтрационных завес

На начальном этапе проводится анализ материалов по геологическому строению закрепленного массива, его геохимическому составу и гидрогеологической обстановке. На основании этих данных **схематизируются постинъекционные условия** существования завесы, т. е. создается модель массива, в которой отражены пространственное взаиморасположение и взаимодействие его компонентов — пород, продуктов искусственной цементации, подземных вод, постинъекционных растворов (специфический тип техногенных флюидов, циркулирующих в порово-трещинном пространстве и содержащих компоненты инъецируемых растворов и продукты химической реакции), их физико-химическая активность и характер массопереноса. Последним шагом схематизации постинъекционных условий является выделение двухкомпонентных систем, в которых можно ожидать активного протекания постинъекционных процессов. К числу таких систем относятся: «гель хими-

ческого раствора — подземные воды», «постинъекционные растворы — гипс», «гель химического раствора—гипс», «скальный грунт — цементный камень», «скальный грунт — гель химического раствора».

Для составления достоверной схемы постинъекционных условий имеет большое значение целенаправленный анализ природных геохимических процессов, которые могут рассматриваться в качестве природных аналогов при прогнозировании образования и развития техногенно-геохимической обстановки. Привлечение **природных аналогов** целесообразно и при сопоставлении прогнозных и фактических данных об изменении качества завес.

Натурные наблюдения проводятся в целях контроля за изменениями в данной техногенно-геохимической системе. Размещение КИА для натурных наблюдений должно обеспечивать возможность проверки прогнозов изменения качества противодиффузионных завес и проведения обратных расчетов для определения проницаемости пород в основании плотин и завесы. Натурные наблюдения обычно включают в себя контроль за напором диффузионных потоков и химическим составом подземных вод. Пьезометры располагаются по профилям, ориентированным максимальным приближенно к путям диффузии.

Одним из важнейших этапов оценки изменения качества противодиффузионных завес являются **лабораторные и экспериментальные исследования**. В процессе этих исследований изучаются выделенные при схематизации постинъекционных условий двухкомпонентные системы в целях получения представления о качественном характере механизма процессов, протекающих в массиве. Лабораторные опыты позволяют выявить основные факторы, обуславливающие те или иные процессы, и установить их относительную значимость, исследовать физико-химическую сущность процессов, изучить направленность изменений в твердой фазе пород и гелей химических растворов.

Изменения во времени коэффициента диффузии K_d выделенных двухкомпонентных систем служат количественным критерием суммарного проявления всех физико-химических процессов в массиве пород и положены в основу оценки изменения качества завес. Изучение закономерности изменения диффузионных свойств, например системы «скальный грунт—тампонажный материал», осуществлялось на образцах скальных пород основания Рогунской ГЭС. В центральной части образцов, выпиленных из керна и имевших толщину 1-2 см, просверливались отверстия диаметром 2 мм. Суммарная площадь отверстий составляла 6 % общей площади диффузии через образец. Затем отверстия заполнялись цементным раствором (В/Ц — 0,5) или химическим гелеобразующим раствором на основе эпоксидной смолы ТЭГ-1 [6]. Образцы помещали в диффузионный прибор, конструкция которого описана в [11], и через них в квазистационарных ус-

ловиях осуществлялась фильтрация воды при градиентах напора от 1 до 100. В результате были получены два типа закономерностей изменения коэффициента фильтрации. Как видно из графиков, показанных на рис. 2, для систем «аргиллит (или песчаник) гаурдакской свиты — гель ТЭГ-1» характерно наличие трех участков: начального, на котором происходит постепенное увеличение K_f , участка резкого возрастания K_f ; участка, на котором коэффициент фильтрации либо незначительно увеличивается, либо остается без изменений. Для систем «аргиллиты (или песчаники) — цементный камень», а также для ненарушенных образцов верхнеюрских аргиллитов и песчаников гаурдакской свиты характерно увеличение K_f по линейной зависимости (рис. 3). Именно эти закономерности изменения коэффициента фильтрации во времени приняты в расчетах изменения качества противофильтрационных завес.

Результаты исследований систем «гель — подземные воды», «постинъекционные растворы — гипс», «гель — гипс» приведены в [12, 13].

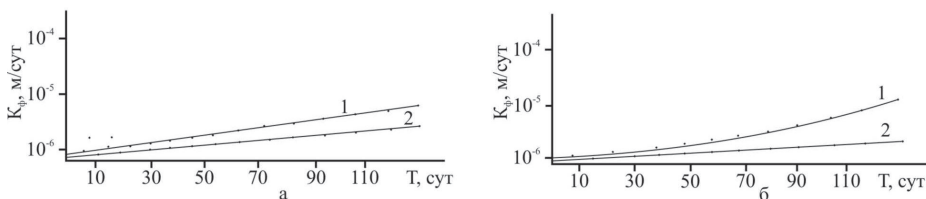


Рис. 2. Изменение коэффициента фильтрации системы «песчаник — гель» (а) и системы «аргиллит — гель ТЭГ-1» (б) при фильтрации дистиллированной воды с градиентами напора: 1- 100; 2 - 10; 3- 1

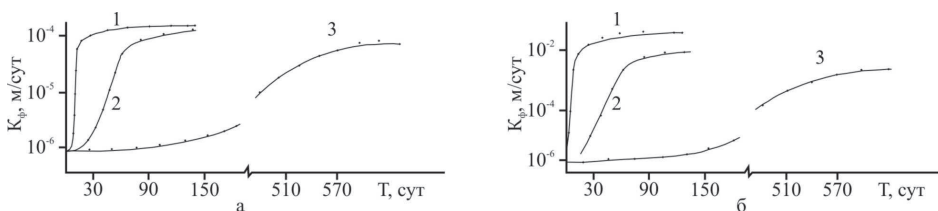


Рис. 3. Зависимость $K_f=f(T)$ при фильтрации дистиллированной воды: а — с градиентом напора 10 для систем: 1 — «аргиллит — цементный камень»; 2 — «песчаник - цементный камень»; б - с градиентом напора 100 для ненарушенных образцов: 1 — аргиллитов; 2 — песчаников гаурдакской свиты в основании Рогунской ГЭС

Математическое моделирование изменения качества завес проводится для количественной оценки суммарного проявления во времени всех постинъекционных процессов, которые отражаются на изменении свойств (прежде всего водопроницаемости) техногенно-геохимической системы. Такое моделирование — один из основных этапов исследований по разработанной комплексной методике. В связи с необходимостью наиболее полного учета при моделировании инженерно-геологических условий все чаще применяются численные методы расчета на ЭВМ, например метод конечных элементов. Математическое моделирование методом конечных элементов выполняется для решения обратных задач. Обратные расчеты позволяют по данным натурных наблюдений за изменениями напоров фильтрационных потоков вычислить изменения коэффициента фильтрации пород в техногенно-геохимической системе и определить размеры зон, в которых произошли эти изменения. При такой постановке задачи можно по данным натурных наблюдений анализировать динамику состояния техногенно-геохимической системы и осуществлять контроль за этим состоянием с использованием постоянно действующей модели. Более подробно методика обратных расчетов и ее применение при анализе изменения качества противифльтрационной завесы в основании Камской ГЭС изложены в [1].

Математическое моделирование методом конечных элементов применяется и для решения прямых задач прогнозирования состояния техногенно-геохимической системы. Эти задачи решают также для выявления основных факторов, влияющих на развитие данной техногенно-геохимической системы, и корректировки объема и состава инженерно-геологических исследований. При этом решение обратной задачи может быть использовано для уточнения значений фильтрационных параметров.

В процессе математического моделирования методом конечных элементов изменения качества высокоплотного противифльтрационного экрана, защищающего пласт соли в основании Рогунской ГЭС, выполнена серия расчетов нестационарной двухмерной напорной анизотропной фильтрации несжимаемой жидкости через уплотненный массив.

На основании данных, полученных в лабораторных экспериментах (см. рис. 2), зависимость изменения во времени коэффициентов фильтрации закрепленного массива задавалась S-образного типа. График этой зависимости аппроксимировался ступенчатой функцией.

В качестве критериев эффективности высокоплотного экрана приняты (рис. 4) расходы потока подземных вод через его элементы: 1 — сверху пласта соли, 2 и 3 — со стороны соответственно нижнего и верхнего бьефов. В элементе 1 суммируются вертикальные расходы, в элементах 2 и 3 — горизонтальные. Период эффективной работы высокоплотного противифльтрационного экрана определяется временем, в течение которого расходы

потока через выделенные элементы возрастут до значений, соответствующих расходам цементации. Анализ полученных данных (рис. 4 а) показывает, что при монотонном увеличении во времени коэффициента фильтрации экрана расходы через выделенные элементы изменяются по более сложным зависимостям. Расходы через элементы 1 и 2 близки между собой и превышают расход через элемент 3 примерно в 20 раз во всем исследованном временном интервале. Через 10-12 лет расходы потоков в элементах 1 и 2 достигнут уровня, соответствующего состоянию массива после проведения цементационных работ, что и определяет эффективный период работы экрана. Более подробно результаты исследований изложены в [14].

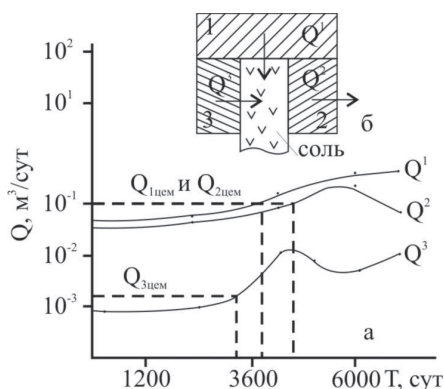


Рис. 4. Результаты математического моделирования изменения суммарных расходов (а) через выделенные элементы (б) защитного экрана пласта соли, залегающего в основании Рогунской ГЭС ($Q_{1\text{цемент}}$, $Q_{2\text{цемент}}$, $Q_{3\text{цемент}}$ — расходы через соответствующие элементы экрана при их плотностях, достигнутых инъецированием цементных растворов)

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа химической активности природной среды и инъецируемых в скальный массив материалов можно выделить системы, наиболее важные с точки зрения исследования протекающих в них физико-химических процессов, влияющих на фильтрационные свойства пород. К таким системам относятся «гель — подземные воды», «инъекционный раствор—подземные воды», «гипс—постинъекционные растворы», «гель — гипс», «грунт — подземные воды», «грунт—тампонажный материал (цемент, гель) — подземные воды» и др.

2. Лабораторные эксперименты показали, что при воздействии на гипс силикатных химических растворов и их компонентов на поверхности гипса образуются пленки труднорастворимых химически стойких соединений (оксалатов и гидросиликатов кальция). При этом увеличивается объем твердой фазы, т. е. происходит дополнительное тампонирующее трещин в массиве гипсоносных пород. Однако исследованиями системы «грунт–тампонажный материал–подземные воды» установлено, что в определенных условиях со временем коэффициент фильтрации возрастает. Выявлены также два типа зависимости его изменения под влиянием постинъекционных процессов: линейная и S-образная. Эти зависимости пригодны для оценки изменения качества противοфильтрационных завес.

3. Разработана комплексная методика прогноза количественного изменения свойств противοфильтрационных завес, включающая в себя лабораторные и натурные эксперименты по выявлению влияния физико-химических процессов на изменение во времени коэффициента фильтрации пород и математическое моделирование изменения во времени фильтрационных параметров завес путем выполнения комплекса взаимосвязанных расчетов на ЭВМ методом конечных элементов. Эта методика позволяет получать более надежные, чем раньше, результаты конкретных расчетов параметров завес и экранов, возводимых в сложных инженерно-геологических и гидрохимических условиях, выбирать оптимальные для данных геохимических условий инъекционные растворы, целенаправленно контролировать фильтрационный поток в основании плотин и заблаговременно предусматривать работы по восстановлению плотности завес и экранов.

Список литературы

1. Воронкевич С. Д., Емельянов С. Н., Максимович Н. Г. Моделирование методом конечных элементов влияния постинъекционных процессов на эффективность противοфильтрационной завесы// Приложение численных методов к задачам геомеханики (МИСИ). М., 1986. С. 90-99.
2. Демьянова Э. А. Растворение и вынос гипса фильтрационным потоком из пород основания плотин// Инженерная геология. 1986. № 6. С. 23-33.
3. Создание противοфильтрационной завесы высокой плотности в гипсоносных карбонатных породах основания Камской ГЭС/ С. Д. Воронкевич, Л. А. Евдокимова, С. Н. Емельянов и др.// Строительство на закарстованных территориях. М.: Стройиздат, 1983. С. 123-125.
4. Воронкевич С. Д., Евдокимова Л. А., Сергеев В. И. Теоретические основы и результаты внедрения способа химического тампонирующего полускальных и скальных пород// Вопросы инж. геологии и грунтоведения. 1978. Вып. 4. С. 199-209.

5. Демин В.Ф., Попов Ю. Д., Аллас Э. Э. Опыт создания противофльтрационной завесы в карбонатных породах// Изв. ВНИИГ им. Веденеева. 1978. Т. 122. С. 81-85.
6. Опыт применения инъекционного раствора на основе эпоксидной смолы для уплотнения скальных осадочных пород в районе створа Рогунской ГЭС/ С. Д. Воронкевич, Л. А. Евдокимова, Н. А. Ларионова и др.// Гидротехническое строительство. 1981. № 10. С. 11-15.
7. Мур Д. Противофльтрационные мероприятия на платине Коунас-Форд// Гражданское строительство. 1965. № 6. С. 11-16.
8. Адамович А. Н. Закрепление грунтов и противофльтрационные завесы в гидроэнергетическом строительстве. М.: Энергия, 1980.
9. Жинью М., Барбье Р. Геология плотин и гидротехнических сооружений. М.: Стройиздат, 1961.
10. Polyurethane groutings in hydraulic engineering// Grouting in Geotechnical Engineering. New York, 1982. P. 403-417.
11. Воронкевич С.Д., Емельянов С.Н., Сергеев В.И. Исследование фльтрационно-осмотических процессов при создании плотных защитных экранов (на примере Рогунской ГЭС). М.: Изд-во МГУ, 1983.
12. Максимович Н.Г., Воронкевич С.Д. Взаимодействие алюмосиликатных гелей с минерализованными подземными водами и его инженерно-геологическое значение// Вестник МГУ. 1983. № 4. С. 78-87.
13. Максимович Н.Г., Сергеев В.И. Влияние химического инъекционного закрепления на устойчивость гипса в основании гидротехнических сооружений// Гидротехническое строительство. 1983. № 7. С. 30-32.
14. Морозов С.В. Прогноз изменения проницаемости химически уплотненных скальных осадочных грунтов в противофльтрационных завесах: Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М., 1985.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Николай Георгиевич Максимович родился 5 октября 1954 г. в г. Перми. В 1972 г. окончил физико-математическую школу и поступил на геологический факультет МГУ, где обучался по специальности «Гидрогеология и инженерная геология». Среди его учителей были академик Е.М. Сергеев, профессора С.Д. Воронкевич, В.А. Всеволожский, Г.А. Голодковская, Г.С. Золотарев, Е.Е. Милановский, М.С. Орлов, В.И. Осипов, В.И. Сергеев, В.Т. Трофимов, В.Е. Хаин, В.К. Хмелевской, В.М. Шестаков, А.Ф. Якушева, О.В. Япаскурт и др. С первых студенческих лет начал заниматься научной работой. После окончания МГУ с 1978 по 1980 г. работал в Естественнонаучном институте при Пермском государственном университете (ЕНИ) в качестве инженера, затем младшего научного сотрудника. Проводил исследования, связанные с уменьшением риска возникновения опасных геологических процессов на территории Пермского края. Участвовал в разработке способов снижения фильтрации в основании Камской ГЭС, в электронно-микроскопических исследованиях грунтов. Ряд его работ этого периода посвящен исследованию карста и пещер.

С 1980 по 1984 г. обучался в аспирантуре МГУ на кафедре грунтоведения и инженерной геологии. В это время параллельно с работой над диссертацией занимался разработкой технологии инъекционного закрепления просадочных грунтов (Душанбе), проблемами строительства Рогунской и Нижне-Каферниганской ГЭС (Таджикистан). В 1984 г. под руководством профессора С.Д. Воронкевича защитил кандидатскую диссертацию, связанную с разработкой уникальной технологии повышения устойчивости Камской ГЭС, находившейся в то время в состоянии, близком к критическому. После окончания аспирантуры продолжает работу в ЕНИ в должности старшего, а с 1987 по 1989 г. — ведущего научного сотрудника. С 1989 г. заведует созданной им лабораторией геологии техногенных процессов, которая решает широкий круг проблем, связанных с экологией, инженерной геологией, гидрогеологией, геохимией, нефтяной геологией, техногенной минералогией, научной спелеологией. Проводятся комплексные экологические работы, инженерно-геологические и инженерно-экологические изыскания, разрабатываются природоохранные технологии и др.

В 1989 г. закончил специальное отделение геологического факультета МГУ по специальности «Новые методы и технические средства при инженерно-геологических изысканиях и прогнозирование изменений геологической среды». В 1995 г. присуждено ученое звание старшего научного сотрудника. С 1996 г. — доцент (по совместительству) кафедры инженерной геологии и охраны недр Пермского государственного университета. В 2004 г.

присвоено звание доцента по специальности «Геоэкология». Как умелый организатор в 1997 г. назначен заместителем директора ЕНИ по научно-исследовательской работе.

Институт под научным руководством Н.Г. Максимовича начал работать над комплексными экологическими проблемами, например, по контракту DTRA с Минобороны США в рамках Российско-американской программы «Совместного уменьшения угрозы». По его инициативе в институте ведется экологическое обучение сотрудников природоохранных органов, предприятий и организаций. Создан сайт института (<http://nsi.psu.ru>), где отражены основные достижения коллектива. В 2001 г. им организовал отдел экологической экспертизы, который работает по договору с Управлением Росприроднадзора по Пермской области по обеспечению Государственной экологической экспертизы. По его инициативе на базе института функционирует система динамического нормирования состояния воздушной среды «Лада», абонентами которой являются около 300 предприятий.

За годы научной деятельности Н.Г. Максимович опубликовал 311 научных работ (47 за рубежом в 22 странах), в том числе 3 учебных пособия. Работы широко цитируются в отечественной и зарубежной литературе. Является автором 3 патентов, 3 научно-популярных книг и ряда публикаций в периодической печати.

Является победителем 24 конкурсов проектов и грантов РФФИ (2002, 2004, 2005 гг.), научно-исследовательской программы Государственного комитета СССР по народному образованию «Геосинтез» (1991 г.), программы Министерства образования РФ «Университеты России» (1992, 1994, 1998, 2002, 2004 гг.), программы «Экологическая безопасность градопромышленных агломераций» (1993 г.), программы Министерства науки и технической политики Российской Федерации (1995 г.), ФЦП «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки» (1997 г.), региональной программы Министерства общего и профессионального образования РФ «Западный Урал: актуальные проблемы научно-технического развития и экологическая безопасность» (1997 г.), Межотраслевой программы сотрудничества Минобразования России и Министерства природных ресурсов РФ по направлению «Научно-инновационное сотрудничество» (2001 г.), Межотраслевой программы сотрудничества Минобразования России с Федеральной службой специального строительства РФ (2002 г.), ФЦП «Интеграция науки и высшего образования России на 2002-2006 годы» (2003 г.), программы Министерства образования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» (2003 г.), конкурса Министерства образования РФ по развитию приборной базы научных исследований (2003 г.), ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и тех-

ники» на 2002-2006 годы по приоритетному направлению «Развитие инфраструктуры» (2005 г.). Ряд работ выполнен в рамках областных программ социально значимых проектов: «Методическое обеспечение снижения экологических последствий при кратковременных выбросах большой мощности» (2002 г.) и «Выявление источников и разработка рекомендаций по снижению загрязнения Камского водохранилища нефтепродуктами» (2002 г.).

На базе этих проектов, например, разработана и прошла опытно-промышленное испытание уникальная технология, позволяющая очищать кислые шахтные воды Кизеловского угольного бассейна от загрязнителей, содержание которых в 100 и более раз превышает допустимые. Для этого используются отходы ОАО «Березниковский содовый завод», миллионы тонн которых накоплены в шламохранилище на берегу Камского водохранилища (патент № 50218). В содружестве с коллегами из МГУ (В.И. Сергеев и др.) создан уникальный защитный экран шламохранилища Пашийского металлургическо-цементного завода, позволяющий снизить до допустимых значений поступление загрязняющих веществ в подземные воды.

Под его руководством в 1987-2006 гг. велись работы по семи бюджетным темам Министерства образования и науки, связанными с разработкой комплекса методов оценки и борьбы с негативными изменениями окружающей среды. Результаты этих работ, помимо большой теоретической значимости, широко используются в практической деятельности.

Научная деятельность Н.Г. Максимовича связана с решением крупных научных и практических проблем. Под его руководством и при непосредственном участии проводились работы по обеспечению экологической безопасности уничтожения химического оружия в г. Щучье Курганской области (1996-2006), Кизнере и Камбарке в Удмуртии (2000-2006), Пензе (1998); изучение последствий испытания и утилизации ракетных двигателей в Перми (2001-2005); добыче и переработке нефти в Пермском (1997-2006) и Хабаровском краях (2005-2006), Тюменской области (2002-2003); разработки угольных месторождений в Бурятии (1990-1993), Красноярском крае (1991-1992), Пермском крае (1985-2006); алмазов и золота в Пермском крае (1993-1996), обоснование строительства Сангтудинской ГЭС-1 в Таджикистане (2006) и др.

Н.Г. Максимович принимал участие при решении многих геологических и экологических проблем Пермского края. Хоздоговорные работы выполнялись для Губахинского химического завода (1984-1991), ОАО «Уралкалий», ОАО «Сильвинит» (1985-2006), Березниковской птицефабрики (1989-1991), Пермской ГРЭС (1992-1993), администрации края и города Перми (1994-2005), Пашийского металлургическо-цементного завода (1994-1997), Чусовского металлургического завода (1996-2004), базовых

станций сотовой связи «Уралсвязьинформ» (2002-2005), ЗАО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез» и др.

С 1996 г. Н.Г. Максимович руководит созданным им филиалом кафедры инженерной геологии и охраны недр Пермского государственного университета. Под его руководством подготовлены более 80 курсовых и дипломных работ, 2 кандидатских и 3 магистерских диссертации.

Н.Г. Максимович был членом редколлегии 9 вузовских, академических и других сборников, членом оргкомитетов ряда совещаний (Москва, Пермь, Кунгур, Миасс, Бари (Италия)). Выступает экспертом при проведении Государственной экологической экспертизы и оппонентом на защите кандидатских диссертаций, экспертом конкурсов РФФИ. Участник крупных международных научных форумов: Будапешт (1989), Нойкирхен ам Гроссвене-дигер, Австрия (1990), Лиссабон (1994), Сингапур (1996), Афины (1997), Бари, Италия (1999), Рио-де-Жанейро, Бразилия (2000), Самчхок, Южная Корея (2002), Дурбан, ЮАР (2002), Боулинг Грин, США (2003), София, Болгария (2005), Ноттингем, Великобритания (2006) и около 130 в СССР и России.

В рамках выигранного конкурса ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» провел в качестве научного координатора в декабре 2005 г. в Перми Международную конференцию «Эколого-экономические проблемы освоения минерально-сырьевых ресурсов».

Сотрудник Итало-Российского института экологических исследований и образования, объединяющего специалистов в области экологии. В рамках института в частности принимал участие в рабочей группе «Глобальный цикл воды» по созданию толкового мультимедийного многоязычного экологического словаря.

Является членом Российской национальной группы Международной ассоциации инженер-геологов, членом Русского географического общества, внештатным сотрудником Института карстоведения и спелеологии. С 1996 г. является действительным членом международной Академии экологии и безопасности жизнедеятельности. С 2005 г. входит в научный совет по наукам о Земле при президиуме Пермского научного центра УрО РАН. Внесен в энциклопедический справочник «Великая Россия. Имена» (Москва, 2002).

Награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени (2004), Почетной грамотой Министерства образования РФ (2003), почетным дипломом Академии наук СССР за цикл научных работ (1985), дважды лауреат Пермского университета (1984, 1991).

ХРОНОЛОГИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ТРУДОВ

1971

1. Маринин А.А., Максимович Н.Г. Искусственная пещера в долине Тулвы // Пещеры.-Пермь, 1971. - Вып. 10-11. - С.195-196.

1976

2. Максимович Н.Г. Карбонатные сталактиты и сталагмиты в подвале Московского университета // Пещеры.- Пермь, 1976. - Вып. 16. - С.24-35.

1978

3. Максимович Н.Г. Сталактиты в подвалах // Пещеры.- Пермь, 1978. - Вып. 17. - С.118-119.

1979

4. Клизас П.Ю., Максимович Н.Г. Электромоделирование фильтрации в связи с химическим доуплотнением гипсоносных пород основания Камской ГЭС // Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей: Тез. докл. науч.-техн. семинара. - Пермь, 1979.-С.60-62.
5. Максимович Н.Г. Взаимодействие гипса с оксалатом натрия - компонентом постинъекционного раствора щавелевоалюмосиликатной рецептуры // Тр. конф. молодых ученых геол. ф-та Перм. ун-та.- Деп.ВНИТИ 17 дек.1979. № 4281-79. Деп. С.80-85.
6. Максимович Н.Г. Взаимодействие гипса с постинъекционным раствором щавелевоалюмосиликатной рецептуры // Октябрьские чтения: Конф. молодых ученых и специалистов Перм. ун-та: Тез. докл. - Пермь, 1979. -С.119.
7. Максимович Н.Г. Методика лабораторного исследования взаимодействия гипса с постинъекционными щелочными кремнеземсодержащими растворами // Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей: Тез. докл. науч.-техн. семинара.- Пермь, 1979. - С.63-65.
8. Максимович Н.Г. Новые методы исследования мумие из пещер Средней Азии // Карст Средней Азии и горных стран: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. - Ташкент, 1979.-С.39-40.
9. Максимович Н.Г., Бельтюкова Н.В. Использование гипса и мирабилита пещер штата Кентукки (США) // Использование пещер: Тез. докл. семинара-совещ. - Пермь, 1979. - С.69-70.
10. Сергеев В.И., Бородина Л.А., Максимович Н.Г. Возможность инъекционного доуплотнения пород на участке развития соляного «оголовка» в основании Рогунской ГЭС // Карст Средней Азии и горных стран: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. - Ташкент, 1979. -С.130-131.

1980

11. Болотов Г.Б., Максимович Н.Г., Бельтюкова Н.В. О методах расчета скорости карстовой денудации // Достижения молодых ученых в об-

- ласти геологии, геофизики, географии: Тез. докл. науч.-практ. конф. - Пермь, 1980. - С.25-26.
12. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Вторичные текстуры сульфатно-доломитовых карстующихся пород с. Усть-Кишерть // Инженерная геология Западного Урала: Тез.докл. науч.-техн. совещ. - Пермь, 1980. - С.67-68.
 13. Емельянов С.Н., Сергеев В.И., Максимович Н.Г. Особенности лабораторных и полевых исследований при создании противифильтрационных завес высокой плотности в скальных тонкотрещиноватых породах (на примере Камской ГЭС) // Инженерная геология Западного Урала: Тез. докл. науч. - техн. совещ. - Пермь, 1980. - С.39-40.
 14. Максимович Н.Г. Влияние покровных отложений на равнинный карст // Карст Нечерноземья: Тез. докл. Всесоюз. науч. - техн. совещ. - Пермь, 1980. - С.25-26.
 15. Максимович Н.Г. Некоторые особенности создания противифильтрационной химической завесы в гипсовых породах основания Камской ГЭС // Карстовый процесс и его прогноз: Тез. докл. - Уфа, 1980. - С.116-117.
 16. Максимович Н.Г. Некоторые проблемы ноосферы // Достижения молодых ученых в области геологии, геофизики, географии: Тез. докл. науч.-практ. конф.- Пермь, 1980. - С.26-27.
 17. Максимович Н.Г. Роль покровных отложений при инженерно-геологической оценке гипсового карста северной части Кунгурского района // Региональная геология некоторых районов СССР. - М.: Изд-во МГУ, 1980. - Вып.4. - С.148-154.
 18. Максимович Н.Г. Химические противифильтрационные завесы в растворимых горных породах // Инженерная геология Западного Урала: Тез. докл. науч.-техн. совещ. - Пермь, 1980.-С.40-42.
 19. Максимович Н.Г., Болотов Г.Б., Бельтюкова Н.В. Формирование карстового рельефа Полазнинского полуострова // Инженерная геология Западного Урала: Тез. докл. науч.-техн. совещ. - Пермь, 1980. - С.61-62.
 20. Максимович Н.Г., Горбунова К.А. Гипсы и ангидриты в основании плитин // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Западно-Сибирской плиты и ее складчатого обрамления: Тез. 2-й годичной конф.-Тюмень, 1980. - С.137-140.
 21. Максимович Н.Г., Зарницын Ю.А. Рентгенометрическое изучение глиняных натеков пещеры Геологов-2 // Карст Нечерноземья: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. - Пермь, 1980. - С.136-137.
 22. Максимович Н.Г., Катаев В.Н., Мырина М.В., Болотов Г.Б. Методика препарирования верхнепермских красноцветов для электронно-микроскопических исследований // Областная отчетная науч. конф: Тез. докл. секции геол.-минерал. наук.-Пермь, 1980. - С.47.

23. Субботин В.А., Максимович Н.Г. Устройство для непрерывного автоматического измерения и регистрации расходов жидкости при длительных процессах // Обл. отчетная науч. конф: Тез. докл. секции геол.-минерал. наук. - Пермь, 1980. - С.51.
24. Gorbunova K.A., Maximovich N.G. Types of karst water discharge in gypsum-anhydrite karst region // Europ. regional conf. of speleology. - Sofia, 1980. - P.61.
25. Pecherkin I.A., Maximovich N.G., Zakoptelov V.E. Types of cave on Kama reservoir scores // Europ. regional conf. of speleology. - Sofia, 1980. - P.34.

1981

26. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Типы разгрузки карстовых вод в районах гипсо-ангидритового карста // Европейска регионална конференция по спелеология: Сб. от материали. - София, 1981. - С.439-441.
27. Дмитриева Т.В., Двинских С.А., Максимович Н.Г., Шерстобитова Н.Г. Биохимическое потребление кислорода как один из показателей качества воды // Комплексное использование и охрана водных ресурсов Дальнего Востока : Тез. докл. 3-го Дальневост. регион. науч. - практ. конф. - Владивосток, 1981. - Ч.2.- С.177-178.
28. Максимович Н.Г. Изучение пещерных отложений под электронным микроскопом // Пещеры. - Пермь, 1981. - Вып. 18. - С.137.
29. Максимович Н.Г. Сталактиты в штольне // Пещеры. - Пермь, 1981. - Вып. 18. - С.129-130.
30. Максимович Н.Г., Бельтюкова Н.В. Вторичные минералы карбонатных карстовых пещер // Пещеры. - Пермь, 1981. - Вып. 18. - С.59-70.
31. Максимович Н.Г., Бельтюкова Н.В. Климатогенные минералы-индикаторы карбонатных карстовых пещер // Аккумуляция зимнего холода в горных породах и его использование в народном хозяйстве: Тез. докл. Кунгурской науч.-техн. конф.- Пермь, 1981. - С.64-65.
32. Максимович Н.Г., Болотов Г.Б. Формы карста на берегах Камского водохранилища // Карст Дальнего Востока: научное значение карстологических исследований: Тез. докл. науч.-практ. конф. - Владивосток, 1981. - С.4-6.
33. Печеркин А.И., Максимович Н.Г., Болотов Г.Б., Закоптелов В.Е. Пещеры и другие карстовые формы в гипсах и ангидритах на побережье Камских водохранилищ // Пещеры. - Пермь, 1981. - Вып. 18. - С.55-58.
34. Печеркин И.А., Максимович Н.Г., Закоптелов В.Е. Типы карстовых пещер на берегах Камского водохранилища // Европейска регионална конференция по спелеология: Сб. от материали. - София, 1981. - С.200-202.

1982

35. Горбунова К.А., Максимович Н.Г., Катаев В.Н. Использование данных рентгеноструктурного анализа пород при изучении сульфатного

карста // Инженерная геология Западного Урала: Тез. докл. науч.-техн. совещ. - Пермь, 1982. - С.94-95.

36. Максимович Н.Г., Болотов Г.Б. Особенности карстового рельефа Полазнинского участка // Физико-географические основы развития и размещения производительных сил Нечерноземного Урала / Перм. ун-т. – Пермь, 1982. - С.84-87.
37. Максимович Н.Г., Сергеев В.И. Исследование в динамических условиях взаимодействия постинъекционных продуктов с гипсами основания Камской ГЭС // Инженерная геология Западного Урала: Тез. докл. науч.-техн. совещ. - Пермь, 1982. - С.90-91.

1983

38. Воронкевич С.Д., Евдокимова Л.А., Емельянов С.Н., Максимович Н.Г., Сергеев В.И. Создание противифльтрационной завесы высокой плотности в гипсоносных карбонатных породах основания Камской ГЭС // Строительство на закарстованных территориях: Тез. докл. Всесоюз. совещ. - М., 1983. - С.123-125.
39. Емельянов С.Н., Максимович Н.Г., Сергеев В.И. Оценка эффективности работы противифльтрационной завесы высокой плотности методом конечных элементов // Применение математических методов и ЭВМ в геологии: Тез. докл. к 3-му обл. семинару.-Новочеркасск, 1983. - С.72-73.
40. Максимович Н.Г., Воронкевич С.Д. Взаимодействие алюмосиликатных гелей с минерализованными водами и его инженерно-геологическое значение // Вестн. Моск. ун-та.-1983. - Сер.4. Геология. - № 4. - С.78-87.
41. Максимович Н.Г., Сергеев В.И. Влияние химического инъекционного закрепления на устойчивость гипса в основании гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. - 1983. - №7. - С.30-32.
42. Maksimovich N.G., Sergeev V.I. Effect of chemical injection stabilization on gypsum stability in the foundation of hydraulic structures // Power Technology and Engineering, 1983. - Vol. 17, № 7. - P. 380-384.

1984

43. Болотина И.Н., Максимович Н.Г. Изучение роли микроорганизмов подземных вод при химическом уплотнении гипсоносных пород основания плотины // Координация исследований на водохранилищах Камского каскада для разработки мероприятий по улучшению экологических условий в водоемах и на прилегающих территориях: Тез. докл. науч.-практ. конф.- Пермь, 1984. - С.44-45.
44. Воронкевич С.Д., Максимович Н.Г. Влияние постинъекционных процессов на эффективность закрепления грунтов // Методы геологических исследований: Тез. докл. науч.-техн. совещ.-Пермь, 1984. - С.78.
45. Емельянов С.Н., Максимович Н.Г., Тейшова И.П. Оценка изменения фильтрационных параметров гипсоносных пород во времени методом

- конечных элементов // Проблемы гидрогеологии и карста: Тез. докл. науч.-техн. семинара. - Пермь, 1984. - Ч.1. - С.72-73.
46. Максимович Н.Г., Сергеев В.И., Тейшова И.П. Влияние химического инъекционного закрепления оснований плотин на изменение геохимической обстановки // Координация исследований на водохранилищах Камского каскада для разработки мероприятий по улучшению экологических условий в водоемах и на прилегающих территориях: Тез. докл. науч.-практ. конф. - Пермь, 1984. - С.31-33.
47. Сергеев В.И., Воронкевич С.Д., Максимович Н.Г., Емельянов С.Н. Применение силикатных растворов для снижения водопроницаемости трещиноватых гипсоносных пород // Проблемы инженерной геологии в связи с промышленно-гражданским строительством и разработкой месторождений полезных ископаемых: Тез. докл. 5-й Всесоюз. конф. - Свердловск, 1984. - Т.1. - С.272-275.
48. Сергеев В.И., Шимко Т.Г., Максимович Н.Г. Способ инъекции силикатного раствора с использованием направленного гидроразрыва // Передовой опыт в фундаментостроении: Тез. докл. к обл. семинару. - Пенза, 1984. - С.82-83.

1985

49. Воронкевич С.Д., Емельянов С.Н., Максимович Н.Г., Морозов С.В. Опыт применения математического моделирования для оценки техногенного воздействия на растворимые основания плотин // Методика изучения карста: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. - Пермь, 1985. - С.143-144.
50. Воронкевич С.Д., Емельянов С.Н., Максимович Н.Г., Морозов С.В. Постинъекционное воздействие на геологическую среду при закреплении грунтов и методы его изучения // Подземные воды и эволюция литосферы. - М.: Наука, 1985. - Т.2. - С.459-462.
51. Воронкевич С.Д., Максимович Н.Г., Емельянов С.Н. Техногенно-геохимические процессы при инъекции силикатных растворов в гипсоносные карбонатные массивы // Геохимия техногенеза: Тез. докл. 1 Всесоюз. совещ. - Иркутск, 1985. - Т.2. - С.40-44.
52. Воронкевич С.Д., Максимович Н.Г., Коломенский Е.Н., Шишлячева В.Н. Основные закономерности постинъекционного взаимодействия силикатных растворов с подземными водами // Инженерная геология. - 1985. - №2. - С.42-54.
53. Двинских С.А., Максимович Н.Г., Носков В.М. Влияние техногенных факторов на природный комплекс Камских водохранилищ // Круговорот вещества и энергии в водоемах. Водные экосистемы. Структура, продуктивность, круговорот веществ. Вопросы охраны и рационального использования: Материалы 6-го Всесоюз. лимнол. совещ.- Иркутск, 1985. - Вып.1. - С.76-77.

54. Двинских С.А., Максимович Н.Г., Носков В.М., Тихонов В.П. Влияние развития промышленности на природные условия водохранилищ // Физико-географические основы развития и размещения производительных сил Нечерноземного Урала: Межвуз. сб. науч. тр. / Перм. ун-т. - Пермь, 1985 - С.79-86.
55. Карпунина Т.И., Бачинская Т.Л., Тихонов В.П., Максимович Н.Г. Формирование микробных сообществ в зонах Камского водохранилища, подверженных промышленному загрязнению фенолами // Научные основы охраны природы Урала и проблемы экологического мониторинга в соответствии с решениями 24 съезда КПСС: Тез. докл. - Свердловск, 1985.- С.24-25.
56. Максимович Н.Г., Носков В.М. Гидрологические и гидрогеологические исследования на территории комплекса по производству метанола в Губахе // Современные проблемы географии: Пути повышения мировоззренческой направленности преподавания географии и проблемы географии: Тез. докл. конф. - Пермь, 1985. - С.126.

1986

57. Абросимов Э.И., Максимович Н.Г., Тихонов В.П. Особенности использования отвалов угольных шахт Кизеловского бассейна в строительных целях // Геологическая среда и рациональное использование минеральных ресурсов Пермской области: Тез. докл. науч.-техн. совещ. - Пермь, 1986. - С.60.
58. Болотина И.Н., Воронкевич С.Д., Максимович Н.Г. О возможности техногенных биогеохимических явлений при силикатизации гипсоносных пород // Вестн. Моск. ун-та. - 1986. - Сер.4. Геология. - №4. - С.49-53.
59. Болотина И.Н., Максимович Н.Г. Микрофлора подземных вод района плотины Камской ГЭС // Водные экосистемы Урала, их охрана и рациональное использование: Информ. материалы.- Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. - С.21.
60. Воронкевич С.Д., Емельянов С.Н., Максимович Н.Г. Моделирование методом конечных элементов влияния постинъекционных процессов на эффективность противofiltrационной завесы // Приложение численных методов к задачам геомеханики: Межвуз. сб. науч. тр. МИСИ.- М.,1986. - С.90-99.
61. Горбунова К.А., Дорофеев Е.П., Максимович Н.Г., Минькевич И.И. Исследование процесса растворения гипсо-ангидритов в условиях Кунгурской пещеры // Пещеры. - Пермь, 1986. -Вып.20. - С.39-47.
62. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Опыт типологического районирования карста на территории СССР // Картографирование и районирование карста в связи с освоением территорий: Тез. докл. 4-й Всесоюз. карстово-спелеол. совещания. - Владивосток, 1986. - С.29-30.

63. Максимович Н.Г. Исследование взаимодействия гипса с щелочными растворами в связи с химическим уплотнением пород основания Камской ГЭС // Региональная геология СССР.- М.: Изд-во МГУ, 1986. - Вып. 7. - С.76-83.
64. Максимович Н.Г. Монография о гидрогеологии карста // Пещеры.- Пермь, 1986.-Вып.20.-С.118.
65. Максимович Н.Г., Абросимов Э.И. Изменение состава подземных вод при использовании пород шахтных отвалов в строительных целях // Вопросы охраны подземных вод Урала: Тез. докл. 2-го Уральского науч.-координ. совещ. по охране подземных вод Урала и сопредельных регионов. - Свердловск, 1986. - Ч.1. - С.41.
66. Максимович Н.Г., Тихонов В.П. Формирование агрессивных к бетонным фундаментам подземных вод при использовании отвалов угольных шахт // Эффективные методы инженерно-геологических исследований Урала: Тез. докл. семинара. - Пермь, 1986. - С.47-48.
67. Максимович Н.Г., Тихонов В.П. Формирование химического состава подземных вод в искусственных грунтах, содержащих отвалы угольных шахт // Повышение эффективности природоохранных работ в угольной промышленности: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф.-Пермь, 1986. - С.17-18.
68. Тихонов В.П., Максимович Н.Г. Метод управления воздушно-водным режимом почв в зоне влияния водохранилищ // Мелиорация Нечерноземья: Тез. докл. 7-й Всесоюз. конф. по мелиоративной географии: Проблемы мелиорации в связи с оптимизацией природопользования в условиях Нечерноземья Европейской части СССР. - Л., 1986. - С.83-84.
69. Gorbunova K.A., Maximovich N.G. Typological zonation of karst in the USSR // Communication 9. Congress Int. de Espeleologic. - Barselona, 1986. - Vol. 1. - P.191-193.

1987

70. Баньковская В.М., Максимович Н.Г. Охрана рек Камского бассейна от загрязнения сточными водами предприятий угольной промышленности // Охрана от загрязнений сточными водами водоемов бассейнов внутренних морей: 1 секция проблем и региональных аспектов охраны от загрязнения сточными водами водоемов: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. - Тбилиси, 1987. - С.7-8.
71. Воронкевич С.Д., Емельянов С.Н., Морозов С.В., Максимович Н.Г. Методика оценки изменения во времени качества противифильтрационных завес в скальных растворимых грунтах // Энергетическое строительство.- 1987. - №7. - С.15-18.
72. Воронкевич С.Д., Максимович Н.Г., Емельянов С.Н. Основы методики изучения постинъекционных процессов при химическом тампони-

- ровании скальных пород оснований плотин // Инженерная геология. - 1987. - №1. - С.37-49.
73. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Изменение гидрохимических условий в процессе строительства // Инженерно-гидрологические и гидрогеологические исследования в Уральском регионе и вопросы охраны и рационального использования геологической среды: Тез. докл. семинара.- Свердловск, 1987. - С.35-36.
74. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. История использования пещер на территории СССР // Проблемы комплексного изучения карста горных стран: Тез. докл. междунар. симпоз. спелеологов. - Тбилиси, 1987. - С.52-53.
75. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Опыт выделения мегатипов закарстованных территорий // Гидрогеология и карстоведение. Методика изучения карста: Межвуз. сб. науч. тр. / Перм. ун-т.- Пермь, 1987. - С.81-86.
76. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Основные направления развития спелеологии // Проблемы изучения, экологии и охраны пещер: Тез. докл. 5-го Всесоюз. совещ. по спелеологии и карстоведению. - Киев, 1987. - С.4-6.
77. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Перспективы использования гипсовых пещер // Практическое использование пещер гипсового карста и их охрана в свете задач основных направлений развития народного хозяйства: Тез. докл. совещ.- Пермь, 1987. - С.8-10.
78. Максимович Н.Г. Возможное развитие негативных процессов при использовании пород шахтных отвалов в строительстве // Повышение эффективности природоохранных работ в угольной промышленности: Материалы Всесоюз. науч.-техн. конф.- Пермь, 1987. - С.114-118.
79. Максимович Н.Г. Особенности строительства промышленных объектов на химически активных искусственных грунтах // Новые конструктивные и технологические решения устройства оснований и фундаментов для условий Урала: Тез. докл. обл. науч.-практ. конф.- Свердловск, 1987. - С.25-26.
80. Максимович Н.Г. Оценка состояния оснований плотин на растворимых породах // Комплексное исследование гидрологии и водной экологии Камских водохранилищ и рек их водосборов: Межвуз. сб. науч. тр.- Пермь, 1987. - С.114-121.
81. Максимович Н.Г. Проблемы управления геологической средой промышленных зон городов // Современные проблемы инженерной геологии и гидрогеологии территории городов и городских агломераций. - М.: Наука, 1987. - С.268-270.
82. Максимович Н.Г., Абросимов Э.И. Формирование техногенно-геохимической обстановки при использовании пород отвалов угольных месторождений в строительных целях // Охрана и рациональное использование геологической среды: Межвуз. сб. науч. тр./ Перм. политехн. ин-т. - Пермь, 1987. -С.76-81.

83. Максимович Н.Г., Тихонов В.П. Изменение инженерно-геологических условий при использовании пород отвалов угольных шахт в строительстве // Комплексные исследование физических свойств горных пород и процессов: Тез. докл. 9-й Всесоюз. науч. конф.- М., 1987. -С.161.
84. Максимович Н.Г., Тихонов В.П. Режимные наблюдения техногенных процессов на промышленных объектах // Проблемы инженерной географии (Инженерно-геоморфологические и инженерно-геологические аспекты): Тез. докл. Всесоюз. конф. - М., 1987. - С.238-239.

1988

85. Горбунова К.А., Дорофеев Е.П., Минькевич И.И., Максимович Н.Г. Исследование процесса растворения гипса и ангидрита в пещере // Карстово-спелеологические исследования, использование и охрана закарстованных территорий и пещер Западного Кавказа: Тез. докл. 2-го регион. карстолого-спелеологического совещ.- Сочи, 1988. - С.16-17.
86. Горбунова К.А., Ожигбесов В.П., Бельтюков Г.В., Максимович Н.Г. Методические указания по учебной геологической практике для студентов 1-го курса. - Пермь, 1988.-44 с.
87. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Типы обстановок карстообразования на территории СССР // Инженерная геология. - 1988. - №4. - С.93-97.
88. Костицын В.И., Колосов А.И., Максимович Н.Г. Возможности использования высокоточных гравиметрических наблюдений для изучения режима подземных вод в пределах крупных промышленных комплексов // Инженерно-геологические и гидрогеологические исследования в Уральском регионе с применением геофизических методов: Тез. докл. семинара.- Свердловск, 1988. - С.11-12.
89. Максимович Н.Г. Активизация карста в основании плотин и методы борьбы с ней // Проблемы изучения техногенного карста: Тез. докл. регион. совещ. — Кунгур, 1988. - С.59-60.
90. Максимович Н.Г., Горбунова К.А. Изменение окружающей среды в процессе строительства // Экзогенные процессы и окружающая среда: Количественный анализ взаимодействия: Тез. докл. 19-го Пленума Геоморфол. комиссии АН СССР. - Казань, 1988.- С.93.
91. Максимович Н.Г., Журавлев В.Е., Симонова Т.П., Жуланова Е.В., Трофимова Н.И. Разработка способов нейтрализации агрессивных к бетону сульфатных подземных вод // Естественные науки - народному хозяйству: Тез. докл. - Пермь, 1988. - С.13.
92. Шувалов В.М., Кузнецова Т.В., Максимович Н.Г. Об опыте геофизических исследований на территории Губахинского комбината «Метанол-750», выполненных с целью изучения электрических свойств горных пород и динамики подземных вод // Комплексное исследование

недр Западного Урала - путь ускоренного развития народного хозяйства региона: Тез. докл. науч.-теорет. совещ. - Пермь, 1988. - С.86.

93. Gorbunova K.A., Maksimovich N. G. Types of conditions for karst formation in the USSR // Soviet Engineering Geology (Inzhenernaya Geologiya), 1988. - № 4.- P.75-81.

1989

94. Баньковская В.М., Максимович Н.Г. Геохимические изменения природной среды в районах размещения отвалов угледобывающей промышленности // География и природные ресурсы. -1989. - №2. - С.42-45.
95. Воронкевич С.Д., Максимович Н.Г., Емельянов С.Н. Основы комплексного подхода к изучению техногенно-геохимических процессов при создании противифльтрационных завес и экранов // Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии районов интенсивной инженерной нагрузки и охрана геологической среды: Тез. докл. I Всесоюз. съезда инженеров-геологов, гидрогеологов и геоэкологов. - Киев: Наукова думка, 1989.-Ч.4.-С.27-29.
96. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. История использования пещер на территории СССР // Проблемы комплексного изучения карста горных стран: Материалы междунар. симпозиума спелеологов.- Тбилиси: Мецниереба, 1989. - С.269-271.
97. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Карст объединяет исследователей: Междуна. связи // Наука Урала. - 1989. — 7 дек, № 47. - С.3.
98. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Направленность изменения земной коры в областях развития карста // Роль подземной гидросферы в истории Земли: Тез. докл. Всесоюз. семинара.- Л., 1989. - С.80-82.
99. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Спелеогенез и эволюция земной коры // International Cong. of Speleology. -Budapest, 1989.-Т. II.-P.386-387.
100. Колосов А.И., Костицын В.И., Максимович Н.Г. Изучение режима подземных вод методом гравиразведки // Подземные воды Урала и методы их изучения и использования: Тез. докл. 3-го Всеуральского науч.-коорд. совещ. по охране и рациональному использованию подземных вод Урала. - Свердловск, 1989. - Ч.2. - С.83-84.
101. Кропачев А.М., Максимович Н.Г. Комплексный подход к изучению техногенных грунтов // Новые прогрессивные способы комплексного изучения недр Урала - путь ускоренного развития народного хозяйства: Тез. докл. науч.-техн. совещ. - Пермь, 1989. - С.88.
102. Максимович Н.Г., Баньковская В.М., Кулаткина А.Ю. Возможности снижения отрицательного влияния угольных отвалов на геологическую среду // Охрана и рациональное использование геологической среды в районах интенсивного хозяйственного освоения УССР и юга РСФСР: Межресп. семинар: Тез. докл. - Киев, 1989. - С.76-77.

103. Максимович Н.Г., Горбунова К.А. Изменение гидрогеологических условий в процессе строительства крупного агропромышленного комплекса // Инженерная геология. - 1989. - № 5. - С.61-65.
104. Максимович Н.Г., Горбунова К.А. Экскурсии пермских карстоведов по карстовым районам Венгрии // Вопросы Уральской спелеологии: Тез. докл. конф. - Пермь, 1989. - С.51-53.
105. Maksimovich N.G., Gorbunova K.A. Change in hydrogeological conditions during construction of a large agroindustrial complex // Soviet Engineering Geology (Inzhenernaya Geologiya), 1989.- № 5. - P.52-56.

1990

106. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. 10-й Международный спелеологический конгресс // Пещеры: Проблемы изучения: Межвуз. сб. науч. тр. - Пермь, 1990. - Вып. 22. - С.119-120.
107. Горбунова К.А., Максимович Н.Г., Андрейчук В.Н. Техногенное воздействие на геологическую среду Пермской области. - Пермь, 1990. - 44 с.
108. Горбунова К.А., Максимович Н.Г., Минькевич И.И., Андрейчук В.Н. Виктор Николаевич Дублянский (к 60-летию со дня рождения) // Пещеры: Проблемы изучения: Межвуз. сб. науч. тр.- Пермь, 1990. - Вып. 22. - С.111-112.
109. Измайлов А.А., Максимович Н.Г., Сергеев В.И., Шимко Т.Г. Противокарстовая защита гидротехнических сооружений на гипсоносных породах // Противокарстовая защита объектов строительства: Материалы Всесоюз. совещ. - Куйбышев, 1990. - С.141-143.
110. Костарев В.П., Димуhamетов М.Ш., Максимович Н.Г. К характеристике грунтовых условий II типа на участке распространения просадочных грунтов Пермского Прикамья // Лессовые просадочные грунты как основания зданий и сооружений (кн. 3. Инженерно-геологические особенности. Технические мероприятия): Тез. докл. к Всесоюз. науч.-практ. конф.- Барнаул, 1990. - С.52-55.
111. Максимович Н.Г. Геохимические изменения геологической среды в пределах Кизеловского угольного бассейна // Эколого-экономические проблемы угледобывающего региона с подземным способом добычи угля: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. - М., 1990. - С.15-16.
112. Максимович Н.Г., Горбунова К.А. Венгерский журнал «Карст и пещеры» // Пещеры: Проблемы изучения: Межвуз. сб. науч. тр. - Пермь, 1990. - Вып. 22. - С.144.
113. Максимович Н.Г., Горбунова К.А. Формирование агрессивности подземных вод при использовании пород отвалов угольных шахт в строительстве // Инженерная геология. - 1990.-№ 6. - С.90-99.
114. Максимович Н.Г., Кропачев А.М. Геохимические особенности геологической среды в угледобывающих районах // Охрана геологичес-

- кой среды в связи с народнохозяйственным освоением Прикамья: Тез. докл. науч.-техн. совещ. - Пермь, 1990. - С.10-11.
115. Максимович Н.Г., Кропачев А.М., Шлыков В.Г., Кулаткина А.Ю. Минералообразование в отвалах угольных шахт Кизеловского бассейна // Минералогия месторождений Урала: Тез. докл. регион. совещ. - Свердловск, 1990. - Т.2. - С.188-189.
116. Gainanow Sh.Ch., Maximowitsch N.G. Bildungsbedingungen und mineralogische Besonderheiten der berpermer Rotsediment // Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft.-1990. - № 135. - P.26.
117. Gorbunova K.A., Maximovich N.G., Kostarev V.P., Andreichuk V.N. Technogenic impact on the karst in Perm region // Studia carstologica. - 1990. - № 2. - P.37 - 43.
118. Maksimovich N.G., Gorbunova K.A. Formation of aggressivity of groundwaters when rocks from coal-mine dumps are used in construction // Soviet Engineering Geology (Inzhenernaya Geologiya), 1990. - № 6.- P.75-82.
119. Maximovich N.G., Gorbunova K.A. Geochemical aspects of the geological medium changes in coal fields // Proceeding of 6 Int. Congress Int. Ass. of Engineering Geology. A.A.Balkema. - Rotterdam, 1990. - P.1457-1461.

1991

120. Баньковская В.М., Максимович Н.Г. Гидрогеохимические исследования в целях охраны подземных вод Холбольджинского угольного разреза // Всесоюз. совещ. по подземным водам Востока СССР (XIII совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока): Тез. докл. - Иркутск; Томск, 1991. - С.115.
121. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. В мире карста и пещер. — Пермь: Изд-во Томск. ун-та, 1991. — 120 с.
122. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Техногенное воздействие на закарстованные территории Пермской области // География и природные ресурсы. - 1991. - № 3. - С.42-46.
123. Максимович Н.Г., Горбунова К.А. Геохимические изменения геологической среды при разработке угольных месторождений // Изв. вузов. Геология и разведка. - 1991.- № 5. - С.137-140.
124. Максимович Н.Г., Горбунова К.А. Опыт оценки состояния геологической среды Пермской области // Проблемы организации территории регионов нового освоения: Материалы конф.- Хабаровск, 1991. - Ч.3. - С.80-81.
125. Gorbunova K.A., Maximovich N.G. Karst breccia - as a genetic variety of quaternary deposits // Abstracts Int. union for Quaternary research XIII Int. congress. - Beijing, China, 1991. - P.117.
126. Gorbunova K.A., Maximovich N.G., Kostarev V.P., Andreichuk V.N. Technogenic impact on the karst in Perm region // Geology, Climate,

Hydrology and Karst Formation: Project IGCP 299, Newsletter. - Guilin, China, 1991. - P.85-90.

127. Maximovich N.G., Gorbunova K.A. Geological conditions of Kizel coal basin mining // XII International Congress on Carboniferous and Permian Geology and Stratigraphy: Abstracts. Buenos Aires, Sept. 1991. - Buenos Aires, 1991. - P. 60-61
128. Maximovich N.G., Gorbunova K.A. Man-made deposits of coal fields. Abstracts Int. union for Quaternary research XIII Int. congress. - Beijing, China, 1991.-P.235.

1992

129. Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г. Карст и пещеры Пермской области. - Пермь, 1992. - 200 с.
130. Двинских С.А., Максимович Н.Г., Закоптелов В.Е. Методический подход к разработке основ региональных экологических экспертиз // Человеческое измерение региональных проблем: Тез. докл. междунар. симпоз. - Биробиджан, 1992. - Ч.2. - С.131-133.
131. Костарев В.П., Малахова Т.Е., Малахов В.Е., Максимович Н.Г. Об основах геоэкологического мониторинга и роль в нем инженерно-геологических изысканий // Проблемы гидроэкологии Башкирии: Тез. докл. и сообщ. науч.-практ. конф. - Уфа, 1992. - С.74-75.
132. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Новый способ защиты подземных конструкций от агрессивных подземных вод // Проблемы гидроэкологии Башкирии: Тез. докл. и сообщ. науч.-практ. конф. - Уфа, 1992. - С.90-91.

1993

133. Блинов С.М., Горбунова К.А., Максимович Н.Г., Малеев Э.Е. Литолого-фациальная обусловленность изменений геологической среды Кизеловского угольного бассейна // Геология и минеральные ресурсы Западного Урала: Тез. докл. науч. конф.-Пермь, 1993.-С.46.
134. Горбунова К.А., Дорофеев Е.П., Максимович Н.Г. Кунгурская пещера как объект научных исследований// Пещеры. Итоги исследований: Межвуз. сб. науч. тр. - Пермь, 1993. - Вып. 23-24. - С.113-120.
135. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Закономерности распространения карста в Пермской области // Инженерная геология карста: Докл. Междунар. симпоз. - Пермь, 1993. - Т.2. - С.108-111.
136. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Из истории изучения карста эвапоритов // Свет.: Вестник Киевского карстолого-спелеологического центра. - Киев, 1993. - №1 — 2 (7-8). - С.32.
137. Горбунова К.А., Максимович Н.Г. Тектоническая зональность карста // Proceeding of the XI Int. congress of Speleology. - Beijing, China, 1993. - P.10.
138. Двинских С.А., Максимович Н.Г. Методический подход к оценке устойчивости природной среды к антропогенным воздействиям // Че-

- ловеческое измерение в региональном развитии: Тез. докл. междунар. симпоз.- Биробиджан, 1993. - Ч.2. - С.57-60.
139. Костарев В.П., Димуhamетов М.Ш., Максимович Н.Г. К использованию показателя интенсивности глубинной эрозии в оценке гидрогеологических условий строительства // Инженерная география: Инженерно-геоморфологические аспекты: Тез. межгос. конф.— Вологда, 1993. - Ч.1. - С.39-40.
140. Макарова О.В., Максимович Н.Г., Блинов С.М. Геоэкологические проблемы Кизеловского угольного бассейна // Экология и здоровье: Тез. докл. - Пенза, 1993. - Ч.2.-С.20-22.
141. Максимович Н.Г. Плотины на гипсоносных породах - объекты повышенной опасности // Тематический семинар по экологическим катастрофам и учету их экономических, социальных и медицинских последствий: Тез. докл. -Уфа, 1993. - С. 94-96.
142. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Основы методики изучения техногенных изменений среды в районах складирования отходов // Экологическая безопасность зон градопромышленных агломераций Западного Урала: Тез. докл. семинара. - Пермь, 1993. - С.46-48.
143. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Трансформация химического состава гидросферы в пределах Кизеловского угольного бассейна // Многоцелевые гидрогеохимические исследования в связи с поисками полезных ископаемых и охраной подземных вод: Тез. докл. Всерос. совещ.-Томск, 1993. - С.84-85.
144. Максимович Н.Г., Малеев Э.Е. Геоэкологическая характеристика Губахинского района Пермской области // Геоэкологические аспекты хозяйствования, здоровья и отдыха: Тез. докл. на межгос. науч. конф.- Пермь, 1993. - Ч.1. - С.77-81.
145. Максимович Н.Г., Малеев Э.Е. Техногенно-геохимические процессы Кизеловского бассейна // Экологическая безопасность зон градопромышленных агломераций Западного Урала: Тез. докл. семинара. - Пермь, 1993. - С.48-49.
146. Максимович Н.Г., Малеев Э.Е., Блинов С.М. Возможность создания искусственных геохимических барьеров для борьбы с негативными процессами в Кизеловском угольном бассейне // Экологические проблемы горного производства: Тез. докл. науч.-техн. конф. - М., 1993. - С.33-34.

1994

147. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Использование геохимических методов для нейтрализации сред, агрессивных к подземным конструкциям // Состояние и перспективы развития научно-технического потенциала Южно-Уральского региона: Тез. докл. межгос. науч.-техн. конф.- Магнитогорск, 1994. — С. 111-112.

148. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Нейтрализация геохимическими методами сред, агрессивных к подземным конструкциям // Геология. - М.: Изд-во МГУ, 1994. - Ч.2. - С.124-133.- (Программа «Университеты России»).
149. Максимович Н.Г., Блинов С.М., Катаев В.Н. Геохимические последствия сброса в карстовые полости кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна // IV объедин. симпоз. по проблемам прикладной геохимии, посвященный памяти академика Л.В.Таусона: Тез. докл.-Иркутск, 1994. - Т.2. - С.67-68.
150. Максимович Н.Г., Блинов С.М., Малеев Э.Е. Техногенные изменения геологической среды Кизеловского района // Вопросы физической географии и геоэкологии Урала: Межвуз. сб. науч. тр. - Пермь, 1994. - С. 32-39.
151. Максимович Н.Г., Макарова О.В. Влияние разработки алмазов на поверхностные и подземные воды в бассейне р.Вишеры // Всеуральское совещ. по подземным водам Урала и сопредельных территорий, посвященное 90-летию со дня рождения профессора Г.А.Максимовича: 4-е науч. чтения: Тез. докл. - Пермь, 1994. - С.46-48.
152. Максимович Н.Г., Макарова О.В. Техногенно-геохимические процессы при разработке месторождений золота бассейна р. Вишеры (Северный Урал) // IV объедин. симпоз. по проблемам прикладной геохимии, посвященный памяти академика Л.В.Таусона: Тез. докл. -Иркутск, 1994. - Т.2. - С.68-69.
153. Наумов В.А., Максимович Н.Г., Макарова О.В. Условия формирования и прогнозирование изменения золотоносности техногенных россыпей (на примере Вишерского района) // Прогнозирование и методика геолого-геофизических исследований месторождений полезных ископаемых на Западном Урале: Тез. докл. науч. конф. - Пермь, 1994. - С.22-23.
154. Gorbunova K.A., Maximovich N.G. Formation of sulfate-calcic waters in Kungur Cave massif // Cave and Karst Science: Abstract. - 1994. - Vol. 21, № 1. - P.12.
155. Gorbunova K.A., Maximovich N.G. The Program of Investigation in Kungur Ice Cave // Newsletter. Geology, Climate, Hydrology and Karst Formation. Project IGCP 299. — Guilin, China, 1994. - P.36.
156. Gorbunova K.A., Maximovich N.G., Kostarev V.P. Technogenic activation of karst sinks in Perm region // Proceeding of 7 Int. Congress Ass. of Engineering Geology. — Lisboa, Portugal, 1994. - Vol. 3. - P.1929-1931.
157. Maximovich N.G., Blinov S.M. The use of geochemical methods for neutralization of surroundings aggressive to underground structures // Proceeding of 7 Int. Congress Ass. of Engineering Geology. — Lisboa, Portugal, 1994. - Vol.5. - P.3159-3164.

1995

158. Горбунова К.А., Максимович Н.Г., Шлыков В.Г. Минералы инфлювия Кунгурской пещеры // Современные проблемы геологии Западного Урала: Тез. докл. научн. конф. - Пермь, 1995. - С.139.
159. Горбунова К.А., Молоштанова Н.Е., Максимович Н.Г., Яцина И.И. Геохимически измененные породы и вторичные минеральные образования Кунгурской пещеры // Кунгурская ледяная пещера. - Пермь, 1995. - С. 26-58.
160. Катаев В.Н., Максимович Н.Г., Блинов С.М. Загрязнение карстовых вод Кизеловского угольного бассейна // География и природные ресурсы. — 1995. - №1. - С.57-60.
161. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Защита подземных конструкций от агрессивных сред геохимическими методами // Механика грунтов и фундаментостроение: Тр. Рос. конф. по механике грунтов и фундаментостроению. - СПб., 1995. - Т.3. - С.414-419.
162. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Использование грунтовых фильтров для очистки сточных вод месторождений алмазов в бассейне р. Вишера // Инженерно-геологическое обеспечение недропользования и охраны окружающей среды: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Перм. ун-т. - Пермь, 1995. - С.214-217.
163. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Снижение сульфатной агрессивности подземных вод геохимическими методами // Экологическая безопасность населения в зонах градопромышленных агломераций Урала: Тез. докл. регион. науч.-тех. конф. - Пермь, 1995. -С.105-107.
164. Максимович Н.Г., Катаев В.Н., Блинов С.М. Особенности техногенного воздействия на карстовые воды Кизеловского угольного бассейна // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: Материалы науч.-практ. конф. - Курск, 1995. - С.124-127.
165. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Блинов С.М. Влияние Кизеловского угольного бассейна на геохимию р. Косьвы // Современные проблемы геологии Западного Урала: Тез. докл. научн. конф. - Пермь, 1995. - С.121.
166. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Блинов С.М. Геоэкологические особенности магистральных рек Кизеловского угольного бассейна // Регион и география: Тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. - Пермь, 1995. - Ч.2. - С.250-252.
167. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Блинов С.М. Техногенные минералы донных отложений р. Косьвы в зоне влияния Кизеловского угольного бассейна // Уральская летняя минералогическая школа-95: Материалы межвуз. науч. конф.- Екатеринбург, 1995. - С.94-95.

168. Молоштанова Н.Е., Шлыков В.Г., Максимович Н.Г. Новообразование целестина в ледяной пещере // Кунгурская ледяная пещера. - Пермь, 1995. - С.59-62.
169. Maximovich N.G., Blinov S.M., Menshikova E.A. The influence of Kizel coal basin on the river ecology conditions // Abstracts of XIII international Congress on carboniferous-permian. - Krakow, Poland, 1995. - P.99.
170. Maximovich N.G., Kataev V.N., Blinov S.M. Consequence of the Kizel Coalfield acid mine water disposal into karst cavities // Proceeding of the 8th Int. Symposium on Water-rock Interaction-WRI-8. Russia. Vladivostok, 1995.-P.885-888.

1996

171. Горбунова К.А., Молоштанова Н.Е., Максимович Н.Г. Экзогенное минералообразование в Кунгурской пещере // Моделирование геологических систем и процессов: Материалы регион. конф. - Пермь, 1996. - С.263-265.
172. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Оценка последствий сброса шахтных вод Кизеловского угольного бассейна в карстовые полости // Перспективы развития естественных наук на Западном Урале: Тр. междунар. науч. конф. - Пермь, 1996. - Т.2. Экология. - С.106.
173. Молоштанова Н.Е., Шлыков В.Г., Максимович Н.Г. Новообразования целестина в Кунгурской ледяной пещере // Седиментогенез и литогенез осадочных образований: Тез. докл. Урал. литол. совещ. - Екатеринбург, 1996. - С.148-150
174. Maximovich N.G., Blinov S.M. Effect of diamond mining on the surface and subsurface waters in the Vishera river basin (Northern Urals) and measures to be taken to protect the environment // 30th Int. Geological Congress. - Beijing, China, 1996. - P.318.
175. Maximovich N.G., Kataev V.N., Blinov S.M. Consequence of the Kizel coalfield acid mine water disposal into karst cavities // International Journal of Rock mechanics and mining Sciences and geomechanics Abstracts (GBR). - 1996. - Vol. 33, № 4. - P. 188A-188A(1).
176. Sergeev V.I., Shimko T.G., Kuleshova M.L., Maximovich N.G. Ground water protection against pollution by heavy metals at waste disposal sites // 18th IAWQ Biennial Int. Conference & Exhibition. - Singapore, 1996. - P.44-45.
177. Sergeev V.I., Shimko T.G., Kuleshova M.L., Maximovich N.G. Ground water protection against pollution by heavy metals at waste disposal sites// Wat.Sci.Tech. - 1996 - Vol.34, № 7-8.-P.383-387.

1997

178. Горбунова К.А. Блинов С.М. Максимович Н.Г. Дорофеев Е.П. Факторы формирования режима подземных вод района Кунгурской пещеры// Вестник Перм. ун-та. - 1997. -Вып.4. Геология. - С.148-162.

179. Максимович Н.Г. Геохимия угольных месторождений и окружающая среда // Вестник Перм. ун-та. - 1997. - Вып.4. Геология. - С.171-185.
180. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Изменение условий развития карста под влиянием сброса шахтных вод Кизеловского угольного бассейна // Гидрогеология и карстование: Межвуз. сб. науч. тр. / Перм. ун-т. - Пермь, 1997.-Вып. 12. - С.184-186.
181. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Использование грунтовых фильтров для очистки сточных вод месторождений алмазов в бассейне р. Вишеры // Инженерно- геологическое обеспечение недропользования и охраны окружающей среды : Материалы междунар. науч.-практ. конф.- Пермь, 1997. - С.214-217.
182. Gorbunova K.A, Maximovich N.G., Blinov S.M., Kraev V.G. Factors determining underground water regime of Kungur Cave (the Urals)//The Proceedings of Karst-Water Environment Symposium. - Blacksburg, 1997. — P. 150
183. Lepikhin A.P., Sadokhina E.L., Miroshnichenko S.A., Maximovich N.G., Menschikova E.A. Bottomset beds influence on formation of water quality in rivers of West Ural // The Proceedings of Int. Conference on Contaminated Sediments. - Rotterdam, The Netherlands, 1997. - P.325-331.
184. Maximovich N.G., Blinov S.M. Hydrosphere transformation in the diamond placers mining area in the Vishera river basin, the Urals // Engineering Geology and the Environment. — Rotterdam; Brookfield,1997. - Vol.3. - P.2467-2469.

1998

185. Лехов А.В., Лехов М.В., Максимович Н.Г., Блинов С.М., Шумилова И.Б. Оценка изменений геогидрологических условий при обустройстве Озерного месторождения нефти (Пермская область) // Промышленная экология: Материалы шк.-семинара. — Ростов н/Д, 1998. — Вып.1. - С.79-82.
186. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Применение геохимических барьеров для защиты гидросферы от загрязнения // Экология города: Материалы регион. науч.-техн. конф. - Пермь, 1998. - С.103-105.
187. Максимович Н.Г., Блинов С.М., Меньшикова Е.А. Воздействие твердых отходов Чусовского металлургического завода на состояние р. Чусовой // Проблемы геологии Пермского Урала и Приуралья: Материалы регион. науч. конф. / Перм. ун-т. - Пермь, 1998. - С.152-154.
188. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Блинов С.М. Загрязнение русла р. - Косъвы (бассейн р. Камы) и его экологические последствия // Экология средних и малых городов: Тез. докл. науч.-техн. конф. - М., 1998. - С.15-17.
189. Меньшикова Е.А., Максимович Н.Г. Техногенные минералы аллювия рек Урала // Минералогия Урала: Материалы 3-го регион. совещ.- Миасс, 1998. - Т.2. - С.26-28.

190. Gorbunova K.A., Maximovich N.G., Blinov S.M., Sychkina G.A. Karst water level regime of Kungur cave // *Kras i speleologia*. – Poland, 1998. – Т.9 (XVIII). – P.118-124.

1999

191. Ворончихина Е.А., Двинских С.А., Демидюк В.В., Зиновьев Е.А., Каменщикова В.И., Максимович Н.Г., Ощепкова А.З., Столбов В.А., Шенфельд Б.Е., Шепель А.И., Шкляева Л.С., Шкляев В.А. Экологическая ситуация в Щучанском районе Курганской области. Экологическое нормирование качества среды обитания. – М.; Курган: Изд-во Курган. информ.-аналит. центра по работе с населением по пробл. уничтожения химического оружия, 1999. – 60 с.
192. Ворончихина Е.А., Максимович Н.Г., Казакевич С.В., Блинов С.М. Хемомиграционные процессы в антропогенных ландшафтах субаридной зоны // *Геохимия биосферы: 2-е междунар. совещ., посвящ. памяти проф. А.И. Перельмана: Тез. докл.* – Новороссийск, 1999. – С.10-12.
193. Лепихин А.П., Максимович Н.Г., Садохина Е.Л., Мирошниченко С.А., Меньшикова Е.А. Роль донных отложений в формировании качества воды рек Западного Урала // *Вестник Перм. ун-та*. – 1999. – Вып.3. Геология. – С.299-309.
194. Лехов А.В., Лехов М.В., Максимович Н.Г., Блинов С.М. Организация модельно ориентированного мониторинга на Чумлякском месторождении подземных вод // *Мониторинг геологической среды на объектах горнодобывающей промышленности: Тез. докл. 1-го Всерос. совещ., г.Березники Перм.обл.* – М., 1999. – С.59-60.
195. Максимович Н.Г., Блинов С.М., Казакевич С.В. Геологические особенности и экологические проблемы западной части Курганской области // *Геология Западного Урала на пороге XXI века: Материалы регион. науч. конф.* – Пермь, 1999. – С.321-322.
196. Максимович Н.Г., Блинов С.М., Казакевич С.В. Разработка системы мониторинга геологической среды западной части Курганской области // *Экология, экономика, информатика: Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования: Тез. докл. XXVII shk.-семинара.* – Ростов н/Д, 1999. – С.116-118.
197. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Блинов С.М. Влияние отходов металлургического производства на состояние р.Чусовой // *Геодинамика и геоэкология: Материалы междунар. конф.* – Архангельск, 1999. – С.227-229.
198. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Блинов С.М. Геоэкологическое состояние рек в районах освоения угольных месторождений // *Геология и минеральные ресурсы Европейского северо-востока России: новые результаты и новые перспективы: Материалы XIII Геол. съезда Республики Коми.* – Сыктывкар, 1999. – С.156-159.

199. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Блинов С.М. Минералогия отходов Чусовского металлургического завода // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского: Материалы науч. конф. / Перм. ун-т. - Пермь, 1999. – С.47-48.
200. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Осовецкий Б.М. Твердые техногенные компоненты аллювия - новый объект экологической геологии // Теоретические проблемы инженерной геологии: Тр. междунар. науч. конф. - М.: Изд-во МГУ, 1999. - С.142-143.
201. Максимович Н.Г., Молоштанова Н.Е., Назарова У.В., Шлыков В.Г. Новообразования мирабилита-тенардита в Кунгурской ледяной пещере // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского: Материалы науч. конф. / Перм. ун-т. - Пермь, 1999. – С.24-26.
202. Молоштанова Н.Е., Максимович Н.Г., Шлыков В.Г. Трансформация минералов глин в отложениях Кунгурской пещеры // Вестник Перм. ун-та.- Пермь, 1999.-Вып.3. Геология. -С.232-237.
203. Осовецкий Б.М., Максимович Н.Г., Катаев В.Н., Блинов С.М. Экологические проблемы Западноуральского региона // Водные ресурсы: мониторинг и охрана: Тр. 1-го науч. симпоз.- М.: Изд-во МГУ, 1999. - С.59-62.
204. Шумилова И.Б., Максимович Н.Г., Блинов С.М., Кузнецов Л.Н. Возможные пути борьбы с последствиями разливов нефтепродуктов // Геология, разработка, бурение и эксплуатация нефтяных месторождений Пермского Прикамья: Сб. науч. тр. — Пермь, 1999.—Вып.2. - С.240-249.
205. Maksimovich N.G., Kulesheva M.L., Shimko T.G. Complex screens to protect groundwater at sludge sites. // Protection of groundwater from pollution and seawater intrusion. - Bari, 1999. - P.14.
206. Maximovich N.G., Sergeev V.I., Savenko V.S., Shimko T.G., Blinov S.M. Development of combined screen for groundwater protection in the area of sludge settler // Protection of Groundwater from Pollution and Seawater Intrusion : 2nd Symposium. - Bari, 1999. - September 27- October 1. - C. 87 -95.
207. Osovetskij B.M., Maksimovitch N.G., Kataev V.N, Blinov S.M. Problemi ecologici della regione occidentale degli Urali // Risorse idriche: monitoraggio e tutela. Casa Editrice dell'Universita Statale Lomonosov. - Moscow, 1999. — P.58-61.
208. Sergeev V.I., Shimko T.G., Lapitsky S.A., Maximovich N.G., Gatto L. Ground layer as a geochemical barrier for propagation of ground water pollutants // Ground Layer as a Geochemical Barrier for Propagation of Groundwater Pollutants: Abstracts. - Moskow, 1999. - P.44-45.

2000

209. Блинов С.М., Ворончихина Е.А., Зиновьев Е.А., Казакевич С.В., Максимович Н.Г. Гидрохимический аспект сохранения биоразнообразия экосистем Европейского Севера (на примере заповедника “Вишерский”) // Поморье в Баренц-регионе на рубеже веков: экология, экономика, культура: Материалы междунар. конф.- Архангельск: Ин-т экол. проблем Севера УрО РАН, 2000.- С.31-32.
210. Блинов С.М., Ворончихина Е.А., Казакевич С.В., Максимович Н.Г. Гидрохимический аспект природного наследия (на примере заповедника “Вишерский”) // Природное наследие и географическое краеведение Прикамья: 2-я межрегион. науч.-практ. конф.: Краткие сообщ. / Перм.ун-т. - Пермь, 2000. - С.5-6.
211. Блинов С.М., Казакевич С.В., Максимович Н.Г. Гидрохимические исследования в системе мониторинга особо охраняемых территорий (на примере заповедника “Вишерский”) // Состояние и динамика природных комплексов особо охраняемых территорий Урала: Тез. докл. науч.-практ. конф.- Сыктывкар, 2000. - С.20-22.
212. Блинов С.М., Максимович Н.Г. Методологические основы применения геохимических барьеров для защиты гидросферы от загрязнения // Университеты России- фундаментальные исследования: география: Материалы Всерос. науч. конф. - М.; Новороссийск, 2000. - С.41-42.
213. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Использование геохимических барьеров для защиты подземных и поверхностных вод от загрязнения // Сергеевские чтения. Вып.2: Материалы годичной сессии Науч. совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. — М.: ГЕОС, 2000. - С.224-231.
214. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Опыт использования геохимических барьеров для решения экологических проблем // Экологические проблемы промышленных регионов. - Екатеринбург, 2000. - С.67 - 68.
215. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Последствия уничтожения химического оружия в районе г. Пензы // Геология Русской плиты и сопредельных территорий на рубеже веков: Материалы Всерос. науч. конф., посвящ. памяти В.В.Тикшаева / Саратов. ун-т.- Саратов: Изд-во ГосУНЦ “Колледж”, 2000. - С.113-114.
216. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Технологии реабилитации окружающей среды на основе геохимических барьеров / Контроль и реабилитация окружающей среды: 2-й междунар. симпоз: Материалы симпоз. - Томск, 2000.- С.245-246.
217. Максимович Н.Г., Блинов С.М., Сергеев В.И., Савенко В.С., Шимко Т.Г. Разработка комплексного экрана для защиты подземных вод в районе шламохранилища / Уральский геологический журнал. - 2000. - №2(14). - С.153-166.

218. Максимович Н.Г., Казакевич С.В., Блинов С.М. Закономерности формирования подземных вод и экологические проблемы западной части Курганской области // Тез. докл. Всеросс. совещ. по водам Востока России.- Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. - С. 109 -111.
219. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Блинов С.М. Некоторые техногенные минералы Уральского региона // Минералогия техногенеза - 2000. - Миасс: Ин-т минералогии УрО РАН, 2000. - С.62-67.
220. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Казакевич С.В. Историко - геологическое развитие территории и современная экологическая обстановка // Вестн. Междунар. акад. экологии и безопасности жизнедеятельности. - 2000. - №6. - С.42-46.
221. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Казакевич С.В. Роль геологических факторов в формировании современной экологической ситуации // Экологическая геология и рациональное недропользование: Научн. чтения им. Ф.Ю.Левинсона-Лессинга: Материалы междунар. конф. — СПб., 2000. - С.111-113.
222. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Казакевич С.В., Шлыков В.Г. Минералогия чеганских глин и ее инженерно-геологическое значение // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н.Чирвинского: Сб. науч.ст.-Пермь, 2000. - С.40-43.
223. Максимович Н.Г., Назарова У.В., Ворончихина Е.А. Причины образования оврагов в районе поселка Огурдино // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы регион. науч.-практ. конф. /Перм.ун-т. - Пермь, 2000. - С.307-309.
224. Maximovich N.G., Menshikova E.A., Osovetskiy B.M. Hard technogenic components in alluvium and environment // 31 st International Geological Congress: Abstracts Volume [Electronic resource]. - Rio de Janeiro, Brazil, August 6-17-2000. - Rio de Janeiro, 2000. - Electronic optical disks (CD - ROM).
225. Maximovich N.G., Menshikova E.A., Osovetskiy B.M. Hard technogenic components in alluvium and environment // 31 st International Geological Congress : Abstracts Volume, Rio de Janeiro - Brazil, August 6-17-2000. - Rio de Janeiro, 2000. - P.4355.
226. Maximovich N.G., Menshikova E.A., Osovetskiy B.M. Hard technogenic components in alluvium and environment // Proceedings of the 8th International Congress. International Association of Engineering Geology, Vancouver, 21-25 Sept. 1998. - Rotterdam; Brookfield, 2000. - P.4579-4582.
227. Maximovich N.G., Osovetskiy B.M., Blinov S.M. Geochemical Barriers and Environment Protection // GeoEng 2000: Conference Proceedings [Electronic resource]. 19-24 November 2000. Melbourne, Australia. — Electronic optical disks (CD – ROM).

2001

228. Блинов С.М., Максимович Н.Г. Применение геохимических барьеров для безопасного захоронения отходов // Научно-технический потенциал Западного Урала в области конверсии военно-промышленного комплекса: Тез. докл. Междунар. семинара. - Пермь, 2001.- С.23-24.
229. Блинов С.М., Максимович Н.Г. Применение геохимических барьеров для безопасного захоронения отходов // Научно - технический потенциал Западного Урала в области конверсии военно - промышленного комплекса: Докл. Междунар. семинара. - Пермь, 2001. - С. 57 - 62.
230. Быков В.Н., Максимович Н.Г., Казакевич С.В., Блинов С.М. Природные ресурсы и охрана окружающей среды: Учеб. пособие / Перм. ун-т. - Пермь, 2001. — 108 с.
231. Лехов А.В., Максимович Н.Г., Пенегина Н.Б. Воздействие на подземные воды проектируемого объекта по уничтожению химического оружия в Кизнерском районе Удмуртии // Геологические, геофизические исследования юго-востока Русской плиты: Материалы межвед. конф., Саратов, 2-4 апреля 2001 г. - Саратов, 2001. - С.97.
232. Максимович Н.Г. Некоторые подходы к решению геоэкологических проблем // Вопросы геологии континентов и океанов: (Школа - семинар рос. делегатов на XXXI Междунар. геол. конгр.: Тез. докл.). - М., 2001. - С.54.
233. Максимович Н.Г. Некоторые подходы к решению экологических проблем // Проблемы геологии континентов и океанов: Докл. рос. ученых - участников 31-го МГК (школа - семинар на НИС «Академик Иоффе», июль - август 2000 г.) / Рос. акад. наук. отд - ние геологии, геохимии, геофизики и горных наук (ОГГГГ РАН) и др.; отв. ред. В.И. Гончаров, Ю.В. Миронов. - Магадан: Кордис, 2001. - С.262 - 267.
234. Максимович Н.Г. Новые подходы к решению экологических проблем // Перспективы развития естественных наук в высшей школе: Труды междунар. науч. конф / Перм. ун-т; ЕНИ при Перм. ун-те. - Пермь, 2001. - Т.3. Экология. Предпринимательство в научно - технической сфере. - С.46-50.
235. Максимович Н.Г. Особенности эволюции земной коры в районах развития карстующихся карбонатных пород // Литология и нефтегазоносность карбонатных отложений : Материалы Второго Всерос. литол. совещ. и Восьмого Всерос. симпоз. по ископаемым кораллам и рифам, 5-7 июня 2001 г., Сыктывкар. - Сыктывкар, 2001. - С.44-45.
236. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Влияние Холбольтжинского угольного разреза (Бурятия) на геоэкологическую обстановку //Природные ресурсы Забайкалья и проблемы природопользования: Материалы науч. конф. 10-15 сентября 2001 г. — Чита, 2001. — С. 138-140.

237. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Защита подземных вод от загрязнения в районе шламохранилища металлургическо-цементного завода // Геология и полезные ископаемые Западного Урала : Материалы регион. науч. - практ. конф. / Перм. ун-т. - Пермь, 2001. - С.314 - 316.
238. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Новый метод защиты подземных строительных конструкций от коррозии // Строительство - 2001: Материалы междунар. науч. - практ. конф. / Ростов. строит. ун-т. - Ростов н/Д, 2001.- С.111-112
239. Максимович Н.Г., Блинов С.М., Потапов С.С. Образование техногенных минералов на искусственных геохимических барьерах // Минералогия техногенеза. - 2001. - Миасс: ИМин УрО РАН, 2001.-С. 242-245.
240. Максимович Н.Г., Казакевич С.В., Блинов С.М. Гидрогеологические условия западной части Курганской области // Вестник Перм. ун-та. - 2001. - Вып.3. Геология. - С.159-178.
241. Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А., Казакевич С.В. Исследование возможности повышения агрессивности подземных вод при строительстве на пиритсодержащих глинистых грунтах // Инженерно - геологические проблемы урбанизированных территорий : Материалы Междунар. симпоз., Екатеринбург, Россия 30 июля - 2 августа 2001. - Екатеринбург : Аква - Пресс, 2001.- Т.2. - С.545 - 551.
242. Максимович Н.Г., Сапрохина Н.В. [Рецензия] // Пещеры. - Пермь, 2001. - Вып. 27/28. - С.222 - 224. - Рец. на кн.: Экология чудес природы. Discovering the wonders of our world : Пер. с англ. — Лондон; Нью — Йорк; Сидней; Москва: ЗАО Изд. дом Ридерз Дайджест, 2000.
243. Молоштанова Н.Е., Максимович Н.Г., Назарова У.В. Минеральный состав отложений Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры: Межвуз. сб. науч. тр. / Перм. ун-т. - Пермь, 2001. - Вып.27/28. - С.116 - 128.
244. Ощепкова А.З., Шенфельд Б.Е., Максимович Н.Г., Демаков В.А. Оценка воздействия на окружающую среду объекта по уничтожению химического оружия как комплекс научных исследований// Проблемы загрязнения окружающей среды: Тез. Междунар. конф. — Волгоград; Пермь, 2001. - С.39.
245. Blinov S.M., Maksimovitch N.G. Application of geochemical barriers for safe waste burial // Scientific - technical potential of the Western Urals for conversion of military industrial complex : International Seminar : Abstracts. - Perm, 2001.- P.21-22.
246. Maximovich N.G., Menshikova E.A., Kazakevich S.V. Reseach of the possibility of increase of ground waters' agressiveness during the construction on pyritiferous clay // International Symposium «Engineering geological problems of urban areas»: Proceedings [Electronic resource]. Ekaterinburg, Russia 30 July - 2 August 2001. Ekaterinburg, 2001. - Electronic optical disks (CD - ROM).

2002

247. Геолог - карстовед К.А. Горбунова (1925 - 1996): [Науч. изд.] / Авт.-сост. Е.Г. Максимович, Н.Г. Максимович. - Пермь: Курсив, 2002. - 240 с. - (Ученые Пермского университета).
248. Максимович Н.Г. Филиал кафедры инженерной геологии и охраны недр ЕНИ при ПГУ // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы регион. науч. - практ. конф. - Пермь, 2002. - С.185-187.
249. Максимович Н.Г., Блинов С.М. Разработка способа защиты подземных конструкций от агрессивных сред // Наука, инновации, подготовка кадров в строительстве на 2001-2002 гг.: Науч. - практ. конф.-выставка по результатам реализации в 2002 г. 5-6 декабря 2002 г. Межотрасл. программы сотрудничества Минобразования РФ и Спецстроя РФ: Тез.докл. - М., 2002. - С.31-34.
250. Максимович Н.Г., Блинов С.М., Холостов С.Б., Басов В.Н. Очистка шахтных вод Кизеловского угольного бассейна с использованием отходов ОАО «Березниковский содовый завод» // Экологические проблемы и здоровье населения Верхнекамья: Материалы науч. — практ. конф., 7-9 октября г. Березники. - Пермь, 2002. - С.94-97.
251. Максимович Н.Г., Казакевич С.В. Влияние геологических факторов на формирование экологической обстановки Курганского Зауралья // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы регион. науч. - практ. конф. - Пермь, 2002. - С.239-242.
252. Максимович Н.Г., Казакевич С.В. Использование историко-геологического подхода для оценки современной экологической ситуации // Экология Северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения: Материалы междунар. конф. / Ин-т экол. пробл. Севера, УрО РАН. - Архангельск, 2002. - Т.1. - С.340-345.
253. Потапов С.С., Паршина Н.В., Максимович Н.Г. Минеральные образования на кровле и стенах крестовоздвиженского храма Белогорского Святониколаевского монастыря (Пермская область) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н.Чирвинского: Сб. науч. ст. - Пермь, 2002.- Вып. 4.-С.69 - 78.
254. Maximovich N. G., Menshikova E. A., Osovetsky B. M. Technogenic Associations of River Sediments in a City-Industrial Environment // Engineering geology for Developing Countries : 9 th Congress of the International Association for Engineering geology and the Environment: Keynote Lectures and Extended Abstracts, 16-20 Sept. 2002, Durban, South Africa. - Saieg; Pretoria, 2002. - P. 263.
255. Maximovich N. G., Menshikova E. A., Osovetsky B. M. Technogenic Associations of River Sediments in a City-Industrial Environment // Engineering geology for Developing Countries: 9 th Congress of the

International Association for Engineering geology and the Environment [Electronic resource]. 16-20 Sept. 2002, Durban, South Africa. - Electronic optical disks (CD-ROM). P.1216-1221.

2003

256. Ажимова А.Ю., Киселев Г.П., Лавров И.А., Максимович Н.Г. Исследование радиоактивности в Кунгурской ледяной пещере // Карст и пещеры Кавказа: Материалы IV регионального карстолого-спелеологического совещ. - Сочи, 2003. — С.34-37.
257. Ажимова А.Ю., Киселев Г.П., Лавров И.А., Максимович Н.Г. Радиоактивность Кунгурской ледяной пещеры // Кунгурская ледяная пещера. 300 лет научной и туристской деятельности : Материалы Международ. науч. — практ. конф. — Кунгур, 2003. — С. 168-171.
258. Блинов С.М., Максимович Н.Г. Методологические основы применения геохимических барьеров для окружающей среды // География и окружающая среда. — СПб., 2003. — С.294-304.
259. Блинов С.М., Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А. Современное техногенное минералообразование в аллювии рек Кизеловского угольного бассейна // Минералогия техногенеза. — 2003. — Миасс, 2003. — С.20-38.
260. Блинов С.М., Максимович Н.Г., Найденова Н.Ф. Оценка возможности использования отходов производства соды для нейтрализации кислых шахтных вод // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы регион. науч.-практ. конф. — Пермь, 2003. — С. 301-303.
261. Блинов С.М., Максимович Н.Г., Найденова Н.Ф., Шлыков В.Г., Потапов С.С. Минералогические основы утилизации отходов ОАО «Березниковский содовый завод» // Минералогия техногенеза — 2003. — Миасс, 2003. — С.51-55.
262. Геолог-карстовед К.А. Горбунова: [Науч. изд.] / Авт.- сост. Е.Г. Максимович, Н.Г. Максимович. — Пермь : Курсив, 2002. — 240 с. — (Учебные Пермского университета); Минералогия техногенеза — 2003. — Миасс, 2003. — С.262.
263. Книга об известном российском карстовед К.А. Горбуновой // Уральский геологический журнал. - 2003.- № 1 (31). - С.137-140.- [Рец. на кн.: Геолог — карстовед К.А. Горбунова / Сост.Е.Г. Максимович, Н.Г. Максимович].
264. Максимович Е.Г., Максимович Н.Г. Первым словом было «карст» // Луч — Октябрь. - 2003. - № 10 (165).
265. Максимович Н.Г. Пути повышения долговечности подземных конструкций в сульфатных агрессивных средах // Сборник материалов IV Междунар. науч. — техн. конф. «Актуальные проблемы строительной индустрии» (24-26 июня 2003 г.). — Тула, 2003. - С.38-39.

266. Максимович Н. Г., Казакевич С.В. Роль эволюции литосферы в формировании современной экологической обстановки // Доклады Междунар. школы «Современные методы эколого-геохимической оценки состояния и изменений окружающей среды» (15–20 сентября 2003 г.). — Новороссийск, 2003. — С.110–124.
267. Максимович Н.Г., Казакевич С.В., Горожанцев А.В. Особенности инженерно-экологических изысканий для объектов уничтожения химического оружия // Экологическая геология и рациональное недропользование: Материалы междунар. конф. — СПб., 2003. — С.208–210.
268. Максимович Н.Г., Казакевич С.В., Денисов А.В. Историко-геологическая обусловленность геоэкологических проблем Курганского Зауралья // Проблемы инженерных изысканий для строительства в Уральском регионе: Науч.-практ. конф. 3 июня 2003 г. — Екатеринбург, 2003. — С. 42–45.
269. Тестов Б.В., Шихов Н.И., Максимович Н.Г., Лавров И.А. Кунгурская ледяная пещера и радон // Вестник Уральского отделения РАН. — 2003. — № 1 (3): Наука. Общество. Человек. — С. 49–54.
270. Maximovich N.G., Maximovich E.G. Role of K.A. Gorbunova in studying of karst hydrogeology and ecosystems // Proceedings from the international Conference on Karst Hydrogeology and Ecosystems, Bowling Green. — Kentucky, USA, 2003. — June 3–6. — P.25.

2004

271. Георгий Алексеевич Максимович: [Научное издание] / Авт.—сост. Е.Г.Максимович, Н.Г.Максимович, В.Н.Катаев. — Пермь: Курсив, 2004. — 512 с. — (Ученые Пермского университета).
272. Максимович Н. Г. Защита гидросферы от загрязнения при ликвидации угольных шахт Кизеловского бассейна // Геоэкологические проблемы загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами: 2-я Междунар. геоэколог. конф.: Материалы конф.- Тула, 2004. — С.135–141.
273. Максимович Н.Г. Новые подходы к повышению долговечности подземных конструкций в условиях воздействия агрессивных вод // Проблемы архитектуры и строительства: Сб. материалов XXII регион. науч.—практ. конф.- Красноярск, 2004. — С.147–148.
274. Максимович Н.Г. Пути решения экологических проблем связанных с развитием карста в угледобывающих районах // Карстоведение — XXI век: теоретическое и практическое значение: Материалы Междунар. симпоз. 25–30 мая 2004, Пермь (Россия). — Пермь, 2004. — С.307–312.
275. Максимович Н.Г., Казакевич С.В. Геоэкологические особенности Полазнинского месторождения нефти // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы регион. науч.-практ. конф.- Пермь, 2004. — С.277–280.

276. Maximovich N.G. Impacts of Kizel coal mining on environment (Abstract) // Newsletter. - Guilin, China, 2004. - P.93.
277. Maximovich N.G., Maximovich E.G. In memory of K.A. Gorbunova (1925-1996), distinguished Russian Karst Researcher // Newsletter. - Guilin, China, 2004. - P.114.

2005

278. Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / Под ред. В.Н. Дублянского. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 376 с. — [Гл. 13. Отложения / Н.Е. Молоштанова, Н.Г.Максимович, В.Н. Дублянский, Б.Р. Мавлюдов, У.В. Назарова].
279. Максимович Н. Г. Использование геохимических барьеров для решения проблем угольной промышленности // Экологическая реабилитация промышленных производств и территорий: Юбилейный сб. ст.- Пермь, 2005. С. 267-281.
280. Максимович Н.Г. Создание искусственных механических барьеров для очистки сточных вод россыпных месторождений // Россыпи и месторождения кор выветривания: факты, проблемы, решения: Тез. докладов XIII Междунар. совещания по геологии россыпей и месторождений кор выветривания (РКВ-2005). - Пермь, 2005. - С. 149-152.
281. Максимович Н.Г., Казакевич С.В. Экологические последствия миграции и трансформации нефти в геологической среде. Результаты натурных исследований // Региональный конкурс РФФИ — Урал. Результаты научных исследований, полученные за 2004 г.: Аннотационные отчеты. — Пермь; Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — С.242-245.
282. Максимович Н. Г., Казакевич С. В., Никифоров В. В. Роль карста в формировании нефтяного загрязнения гидросферы в районе п. Полазна // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы регион. науч. - практ. конф. / Перм. ун-т. - Пермь, 2005. - С.290-295.
283. Патент на полезную модель 50218 Российская федерация МПК7 С 02 F 1/66. Установка для нейтрализации кислых шахтных вод / Максимович Н.Г., Басов В.Н., Холостов С.Б.; заявитель и патентообладатель ФГНУ «Естественнонаучный институт». - №2005106661; заявл. 14.03.05; опубл. 27.12.05, Бюл. №36 (Пч.) Изобретения Полезные модели. - с. 350;ил.
284. Потапов С.С., Максимович Н. Г., Исакова Н. А. Антропогенное влияние и деструкция пород в алмазных пещерах (штат Кентукки, США) // Минералогия техногенеза. — 2005. - Миасс, 2005. — С.40-47.
285. Потапов С. С., Паршина Н. В., Максимович Н. Г., Наумов В. А. Техногенные спелеотемы // Минералогия техногенеза — 2005. — Миасс, 2005. — С.12-22.
286. Потапов С.С., Паршина Н.В., Максимович Н.Г., Наумов В.А., Каздым А.А. Натечные техногенные минералообразования (сталактиты

- и коры) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского: Сб. науч. ст. - Пермь, 2005.- Вып. 8. - С.237-250.
287. Суслонов В.М., Максимович Н.Г., Иванов В.Н., Шкляев В.А.. Воздействие на окружающую среду кратковременных выбросов большой мощности: Учеб. пособие / Перм. ун-т. — Пермь, 2005. — 126 с.
288. Суслонов В.М., Максимович Н.Г., Рогозин М.В., Запоров А.Ю., Жекин А.В. Опыт использования комплекса методов при контроле за выбросами предприятий при добыче и переработке алюминийсодержащего сырья // Эколого-экономические проблемы освоения минерально-сырьевых ресурсов: Тезисы докл. Междунар. науч. конф./ ФГНУ «ЕНИ» и др. — Пермь, 2005. — С.209-211.
289. Холостова О.С., Максимович Н.Г. Оценка возможности применения способа очистки кислых шахтных вод отходами содового производства для изливов различных шахтных полей на территории Кизеловского угольного бассейна // Эколого-экономические проблемы освоения минерально-сырьевых ресурсов: Тез. докл. Междунар. науч. конф./ ФГНУ «ЕНИ» и др. — Пермь, 2005 — С.102-103.
290. Hmurchik V.T., Kazakevich S.V., Maximovich N.G., Nikiforov V.V. Development for methods of protection of the Kama reservoir against oil pollution. 3rd Symposium “Quality and Management of Water Resources”. Italian-Russian Institute of Education and Ecological Research and St. Petersburg State University. - St. Petersburg, 2005. — P.77-78.
291. Lavrov I., Maximovich E., Maximovich N. Ordinskaya cave — the longest underwater cave in Russia//Water Resources and Environmental Problems in Karst: Proceedings of the International conference and free seminars, Serbia and Montenegro, 13-19 september 2005: Belgrade, 2005. P. 771-776.
292. Maximovich N.G. Dams on gypsiferous — a possible source of disaster // International Symposium on Latest Natural Disasters — New Challenges for Engineering Geology, Geotechnics and Civil Protection: Abstract Book, September 5-8, 2005. Sofia, Bulgaria. - Sofia, 2005. - P. 65.
293. Maximovich N.G. Dams on gypsiferous — a possible source of disaster // International Symposium on Latest Natural Disasters — New Challenges for Engineering Geology, Geotechnics and Civil Protection: September 5-8, 2005. Sofia, Bulgaria [Electronic resource]. - Sofia, 2005. — Electronic optical disks (CD-ROM).
294. Maximovich N.G. Making of artificial geochemical mechanical barriers for purification of water of placer deposits // Placers and Weathered Rock Deposits: facts, problems, decisions: Abstracts: XIII International Symposium on geology of Placers and Weathered Rock Deposits. - Perm, 2005. - P. 77.

295. Maximovich N. G., Kazakevich S. V., Hmurchik V. T. Development of methods protection of the Kama reservoir from oil pollution // Quality and management of water resources: 3rd Symposium : book of proceedings. St. Petersburg, 2005. P. 362-369.
296. Maximovich N.G., Kazakevitch S.V., Khmurchik V.T., Nikiforov V.V. Oil pollution of the hydrosphere of karst areas // Актуальные проблемы геохимической экологии: Материалы V Междунар. биогеохим. школы (8-11 сент. 2005 г.). - Семипалатинск, 2005. - С. 374-375.

2006

297. Максимович Н.Г. Использование сорбентов на основе активного угля для борьбы с разливами нефти // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. - 2006. - № 10. - С.19-21.
298. Максимович Н. Г. Международная научная конференция «Эколого-экономические проблемы освоения минерально-сырьевых ресурсов» // Горное эхо. - 2006. — № 1 (23). — С.18-20.
299. Максимович Н. Г. Проблемы экологии и экономики при освоении минерально-сырьевой базы // Промышленная экология и безопасность. - 2006. - № 3. - С.27-29.
300. Максимович Н. Г. Создание геохимических барьеров для очистки стоков породных отвалов // Уголь. - 2006. - № 9. - С.64.
301. Максимович Н.Г., Казакевич С.В., Никифоров В.В. Экологические последствия миграции и трансформации нефти в геологической среде. Результаты натурных исследований // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований, полученные за 2005 г.: Аннотационные отчеты / УрО РАН. — Пермь; Екатеринбург, 2006.- С.249-251.
302. Максимович Н.Г., Черемных Н.В., Хайрулина Е.А. Очистка кислых стоков породных отвалов Кизеловского угольного бассейна // Экологические проблемы промышленных регионов: Материалы седьмой Всерос. науч.-практ. конф. - Екатеринбург, 2006. — С.120-121.
303. Максимович Н.Г., Черемных Н.В., Хайрулина Е.А. Экологические последствия ликвидации Кизеловского угольного бассейна // Географический вестник. - Пермь, 2006. - № 2 (4). - С.128-134.
304. Максимович Н.Г., Шенфельд Б.Е., Ошепкова А.З., Хайрулина Е.А. Опыт проведения комплексных инженерно-экологических изысканий объекта по уничтожению химического оружия // Сергеевские чтения. Вып.8: Материалы годичной сессии Науч. совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. - М.: ГЕОС, 2006. - С.40-44.

305. Потапов С.С., Мороз Т.Н., Максимович Н.Г. Калиевые квасцы – первая находка в Кизеловском угольном бассейне // Минералогия техногенеза – 2006. – Миасс-Кунгур, 2006. – С.69-77.
306. Рогозин М.В., Максимович Н.Г., Запоров А.Ю., Жекин А.В. Выбор приоритетных показателей и методов контроля при планировании мониторинга лесных экосистем в зонах многолетнего влияния эмиссий горно-добывающих и перерабатывающих предприятий // Экологические проблемы промышленных регионов: Материалы седьмой Всерос. науч.-практ. конф. - Екатеринбург, 2006. – С.52-53.
307. Хайрулина Е.А., Ворончихина Е.А., Максимович Н.Г. Ландшафтно-геохимические особенности лесостепных экосистем Курганского Завуралья //Ландшафтоведение: Теория, методы, региональные исследования, практика: Материалы XI Междунар. ландшафтной конф./ Географ. фак-т МГУ. - М., 2006. - С.357-359.
308. Хмурчик В.Т., Максимович Н.Г. Борьба с нефтяным загрязнением карста // Антропогенная динамика природной среды: материалы Междунар. науч. - практ. конф. - Пермь, 2006. - Т. 2. - С.375-379.
309. Холостова О.С., Холостов С.Б., Максимович Н.Г. Опыт использования отходов содового производства для очистки кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна // Инженерная экология. – 2006.- № 3.- С.46-54.
310. Maximovich N. Use of alkaline waste products for acid mine water purification // Engineering geology for tomorrow's cities: 10 th Congress of the International Association for Engineering geology and the Environment: Abstracts, 6-10 Sept. 2006. - Nottingham: United Kingdom, 2006. - P 91.
311. Maximovich N. Use of alkaline waste products for acid mine water purification // Engineering geology for tomorrow's cities: 10 th Congress of the International Association for Engineering geology and the Environment: [Electronic resource]. 6-10 Sept. 2006. - Nottingham: United Kingdom, 2006. - Electronic optical disks (CD-ROM).

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- | | | | |
|-------------------|---|------------------|------------------------------|
| Абрамова Т.Т. | 36 | Евдокимова Л.А. | 8, 28, 37, 48, 100, 161 |
| Адамович А.Н. | 162 | Езерски И. | 33 |
| Аллас Э.Э. | 161 | Емельянов С.Н. | 8, 48, 119, 154, 161, 162 |
| Ананьев В.П. | 38, 72, 95 | | |
| Аскалонов В.В. | 37, 100 | Жинью М. | 162 |
| Барбье Р. | 162 | Заварзин А.А. | 5 |
| Бегишев В.П. | 4, 6 | Затенацкая Н.П. | 54 |
| Беклемишев В.Н. | 5 | Зверев В.П. | 20, 98 |
| Белюсова Н.Е. | 58 | Звягинцев Д.Г. | 153 |
| Берг Л.Г. | 100 | Зиангиров Р.С. | 8, 36-38 |
| Бериньи Ш. | 33 | Злочевская Р.И. | 36 |
| Богомолов Г.В. | 53 | Золотарев Г.С. | 8, 96, 163 |
| Болотина И.Н. | 148, 153 | | |
| Валяшко М.Г. | 53 | Казакевич С.В. | 8 |
| Вериго Б.Ф. | 5 | Казанский Ю.П. | 55 |
| Виноградский С.Н. | 149, 150 | Князькова И.С. | 56 |
| Волков Ф.Е. | 36 | Ковда В.А. | 56 |
| Воронкевич С.Д. | 7, 8, 28, 34, 36, 37, 39, 40, 48, 100, 118, 148, 153, 161-163 | Коломенский Е.Н. | 8, 68 |
| Всеволожский В.А. | 163 | Кондратьева Е.Н. | 153 |
| Гениш Г. | 68 | Коробанова И.Г. | 54 |
| Генкель А.Г. | 5 | Кривошеева З.А. | 8, 67 |
| Голодковская Г.А. | 163 | Кузнецов А.М. | 12, 16, 26, 27, 99, 148, 153 |
| Голоднов В.М. | 36 | Купер А. | 8 |
| Гончарова Л.В. | 37, 38 | Кутергин В.Н. | 36 |
| Горбунова К.А. | 8, 168, 169, 172, 174-179, 182, 183, 191, 192 | Лаптев Ф.Ф. | 99 |
| Гуревич Н.С. | 153 | Ларионова Н.А. | 8, 48, 100, 161 |
| Демин В.Ф. | 161 | Лизеганг В. | 60, 76 |
| Демьянова Э.А. | 161 | Лыкошин А.Г. | 96 |
| Денисов А.В. | 8 | Максимович Г.А. | 181, 193 |
| Дивисилова В.И. | 36 | Маменко Г.К. | 12, 20 |
| Дмитриевский Г.Е. | 58 | Манукян А.В. | 101 |
| Дублянский В.Н. | 177, 194 | Мариотт Э. | 84, 106 |
| Дьячкова В.Н. | 37 | Маслов Н.Н. | 99 |
| | | Мехтиева В.Л. | 153 |
| | | Милановский Е.Е. | 163 |
| | | Минервин А.В. | 153 |
| | | Митчелл Э.Р. | 119 |

- | | | | |
|--------------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Молоков Л. А. | 8, 96 | Соколов В.Е. | 37, 38, 103 |
| Морозов А.В. | 38 | Степанова Е.В. | 38, 72, 101 |
| Морозов С.В. | 154, 162 | Субботин В.А. | 107 |
| Морозов С.С. | 34, 37 | | |
| Мур Д. | 162 | Таусон А.О. | 5 |
| Мюллер | 56 | Таусон Л.В. | 181 |
| | | Твенхофел У.Х. | 89 |
| Науменко В.Г. | 99 | Тейшова И.П. | 8, 38 |
| Неймарк И.Е. | 88 | Трофимов В.Т. | 163 |
| Никитин В.В. | 5 | Турцев А.А. | 12, 16, 99 |
| Николаев А.В. | 100 | | |
| | | Усупаев Ш.Э. | 153 |
| Огородникова Е. Н. | 8, 37, 48 | Ухов С.Б. | 119 |
| Окамото Г. | 56 | Уэйт Р. | 119 |
| Орадовская А.Е. | 20 | | |
| Орлов М.С. | 163 | Федотов Д.М. | 5 |
| Осипов В.И. | 68, 163 | Феофарова И.И. | 100 |
| | | Фик А. | 49 |
| Пантер | 58 | Франсуа | 33 |
| Парабучев И.А. | 8, 96 | | |
| Перельман А.И. | 185 | Хаин В.Е. | 163 |
| Пачепский Я.А. | 98 | Хайрулина Е.А. | 8 |
| Пекле Ж.К. | 48 | Хлебникова Г.М. | 153 |
| Петри | 149, 150 | Хмелевской В.К. | 163 |
| Петровский М.Б. | 38 | Хоменко В.П. | 4 |
| Плачинда А.С. | 58 | | |
| Понизовский А.А. | 98 | Чаликова Е.С. | 37, 72 |
| Попов Ю.Д. | 161 | Черкинский Ю.С. | 56 |
| Прочухан Д.П. | 12, 99 | Чирвинский П.Н. | 186, 188, 191, 195 |
| Пуазель Ж.Л. | 108 | | |
| | | Шестаков В.М. | 163 |
| Ржаницин Б.А. | 38, 95, 101 | Шимко Т.Г. | 8, 36 |
| Рихтер А.А. | 5 | Шлыков В.Г. | 8 |
| Румянцева Н.А. | 8 | Шувалова Л.П. | 38, 95 |
| | | | |
| Свешникова Е.В. | 8 | Якушева А.Ф. | 163 |
| Семенов В.В. | 119 | Япаскурт О.В. | 163 |
| Семенов И.В. | 4 | | |
| Сергеев В.И. | 8, 34, 36, 38, 106, 161-163, 165 | James A.N. (Джеймс А.Н.) | 99 |
| Сергеев Е.М. | 34, 163 | Lupton A.R.R. (Лаптон А.Р.Р.) | 99 |
| Сергеева Н.С. | 38 | | |
| Слинякова И.Б. | 88 | Nobukazu I. (Нобукази И.) | 80 |
| Созыкина З.А. | 13 | | |
| Соколов В.Н. | 8, 68 | Ricketts B.D. (Риккетс Б.Д.) | 89 |
| Соколова Е.И. | 56 | | |

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Агар-агар 149
агат 60
агрегация частиц 57
адгезия 29
адсорбция 43, 45
азот 27, 68, 150
акриловый мономер 35
активность
 химическая 40, 42, 43, 44, 51, 52, 98, 133, 160
 физико-химическая 42, 43, 44, 156
акцептор электронов 150
алеврит 13
алевролит 11, 13-15, 17-19, 22, 26, 30, 35, 97, 155
алюминий 44, 54-59, 60, 67
алюминий сернокислый 9, 28, 33, 35, 60, 149, 155
аммиак 38
аммоний 23
аналоги природные 39, 156, 157
анаэробы факультативные 150
анаэробостат 150
ангидрит 11, 14, 16-20, 22, 23, 43, 97, 155
анизотропия 120
анизотропия пород 119
анизотропия фильтрационная 21, 159
арагонит 89
аргиллит 11, 13, 14, 17-19, 21, 22, 26, 30, 35, 97, 155, 158
атомы меченые 58
- Бактерии**
 бесцветные 150
 гетеротрофные 150
 пигментированные 150
 сульфатредуцирующие 149-151
 безопасность плотин 7, 10, 47, 148
- бентонит 80
биосфера 150
битум 148
брекчия 35, 155
бром 23
бьеф
 верхний 21-23, 26-28, 127, 159
 нижний 20-22, 25, 27, 28, 159
- Вапны** 13
вещество органическое 42, 54, 148, 151
водоносность 21
водообильность 22
водопоглощение удельное 9, 29, 30, 32, 35, 155
водопроницаемость 24, 25, 29, 33, 46, 156, 159
водород 27, 98, 151
водохранилище 11, 20, 23-25, 97, 148, 165
воды
 содовые 54
 сточные 36
воронка карстовая 12
время гелеобразования 28, 29, 34, 36, 37, 40, 61, 62, 64, 70, 79
вынос диффузионный 38, 87, 95, 133
выщелачивание 27, 72, 97
вязкость 29, 40, 48, 107
- Газопроявления** 27
газы азотнометановые 23
галит 43
галоупик 67
гашение напора на завесе 9, 24, 32, 130, 131
гель
 гидроокиси железа 87
 глинисто-силикатный 38

кальцийсиликатный 57
магнийсиликатный 57
силикатный замещенный 58
силикатный кальций-магниевый 58, 88
тоберморитовый 111
гидродинамика потоков 132
гидратация 16, 19
гидробиотит 13
гидрокарбонатный ион 25
гидролиз 52, 60, 95
гидромусковит 13
гидрослюда 13, 15
гидрофильность 57
гидрохлорит 15
гипсоносность 12, 16, 18
глауконит 13, 15
глина 13, 23, 35, 36, 54, 89, 155
градиент
гидравлический 46, 106-111
концентраций 48, 51, 99, 128
граниты 35, 155
грунт
агаризованный 149, 150
глинистый 36
лёссовый 36, 37, 72, 101, 149
песчаный 36-38

Давление

избыточное 40, 41
фильтрационное 132
движение жидкости в круглоцилин-
дрической трубе 107
двойники
иксообразные 80
срастания 98
дегидрогенизация 151
деполимеризация 52
деятельность человека инженерная 42, 118

дисперсия гидродинамическая 34, 45, 48, 94, 128
диффузия
встречная 45, 51, 58
молекулярная 48
одномерная 49
сульфатов 16
диффузионный перенос 48, 49, 51
доломит 11, 14, 15, 17, 18, 20, 22-24, 26, 29, 30, 35, 48, 54, 99, 155
дренаж
вертикальный 127
глубинный 23, 24

Емкость

буферная 60
поглощения 43
сорбционная 43

Железа

гидроокись 37, 87
сернокислые соли 73
железо 44, 54, 56, 61, 79, 84, 87, 150
жидкая фаза гелей 38, 45, 47, 58, 72, 80, 84, 86, 87, 101, 102, 104, 105, 115, 150
жидкость интермицеллярная 45, 51, 57-60, 67, 72, 73, 86, 88, 90, 101, 115, 133, 134, 149
жизнедеятельность организмов 54

Завеса мерзлотная 23

закон Фика 49
зародышеобразование 58, 99
золь 28, 55-57, 60-70, 72, 73, 84, 94, 108, 109, 113-115, 117, 129
зона
активного водообмена 53
гипергенеза 42, 54
застойная 51
подрусловой циркуляции 12

разбавления 34, 35, 45, 48, 49, 61, 94, 95, 127

Известняк 11, 13-15, 17-22, 24, 26, 29, 30, 32, 35, 48, 54, 99, 123, 155

изыскания инженерно-геологические 12, 19, 119, 163

испарение 54

источник

термальный 53

углекислый 53

Йод 23

Кальций

сернокислый 23, 77, 78, 81, 83, 84, 86-88

хлористый 33, 58, 78, 80, 89, 95, 98

кальцит 13, 15, 37, 43

кальция

бикарбонат 100

гидроокись 58, 67, 100, 101

гидросиликат 67, 101, 105, 116, 161

оксалат 59, 60, 64, 77-80, 86, 89,

100, 103-105, 109, 110, 112, 115, 116, 133, 161

каменная соль 9, 35, 79, 96, 115, 154, 155

камень цементный 26, 38, 157, 158

карбонаты 13, 15, 16, 37, 48, 54, 96

карст 6, 7, 9, 11, 12, 96, 126, 163

катализатор 35

катализатор крекирующий 72

кварц 13, 15, 43

кern 12, 16, 17, 102, 157

кислота

кремневая 38, 52, 53, 56, 60, 89

кремневая мономерная 52

молибденовая 55

органическая 36, 148, 151

ортокремневая 55

соляная 99

угольная 52

уксусная 151

щавелевая 9, 28, 149

коагулянт 88

коагуляторы 55, 70

коагуляция

кинетическая 43

раствора 36

колодец карстовый 12

кольца Лизеганга 76

комплексы

алюмосиликатные 60

кремнеземо-железистые 54

конвекция 48

конгломерат 35, 97, 155

константа скорости растворения 98

концентрация ионов активная 43

коррозия цементационного камня 26

котловина карстовая 12

коэффициент

диффузии 49, 51, 98

устойчивости плотины 9, 28, 32, 130-132

кремнезем

аморфный 53

диспергированный 56

коллоидный 55, 56, 67

молекулярно-диспергированный 53, 56

кристаллизация 16, 58, 67, 100

кристаллы выращивание 59, 72

критерий Пекле 48

Леганды 44

литификация 44

литогенез 53

Магний

сернокислый 23, 63, 73, 78, 98

хлористый 63, 76, 77, 81, 83, 98

магния дигидрата оксалат 74, 76
марганец 54
массоперенос
 диффузионный 42, 48, 49, 51
 конвективный 42, 48, 49
 смешанный 48
материал гравийно-галечный 24
меланиты 35, 155
мергель 11, 14, 15, 17, 18, 20-24, 26, 29, 30, 35, 48, 96, 99, 155
металлы щелочноземельные 36
метан 27, 42
метод конечных элементов 119, 159, 161
миграция хемогенная 53
микроструктура геля 36
моделирование математическое 127, 134, 156, 159-161
монтмориллонит 36
мука доломитовая 15
мусковит 13, 15

Натрий

 сернокислый 73, 79, 80, 98
 углекислый 80
 хлористый 55, 62, 67, 68, 73, 81, 82, 98
натрия
 бикарбонат 55
 гидроокись 60, 100, 107, 109, 110
 дисиликат 52
 метасиликат 52
 нитрат 55
 оксалат 48, 60, 90, 100, 101-105, 107-110
 ортосиликат 52
 трисиликат 52
никель 58

Область геосинклинальная 53

обмен ионный 45
овраг карстовый 12

оголовок соляной 35
оксалат аммония 100
оолит 74, 76, 80, 81, 89
опреснение подземных вод 25, 27
опробование гидравлическое 22
отвердитель комплексный 28, 60
отвод продуктов реакции 41, 44
отжим цементный 25, 26
отложения
 карбонатно-сульфатные 11
 карбонатные 16
 песчано-глинистые 20, 35
 сульфатные 16

Переконденсация 57, 88

песчаник 11, 13, 19, 26, 35, 97, 155, 158
пещера карстовая 12
пик экзотермический 67
пирит 13, 15
плагиоклаз 13
пленка
 глинистая 36
 железистая 36, 37
полевой шпат 13, 15
полиакриламид 80
поликонденсация 44, 55, 56, 60
полимеризация 44, 51-54
понур 23-25, 120
порог коагуляции 55
породы
 вулканические 53
 глинистые 36, 54
 кварцево-халцедоновые 54
 кремнисто-карбонатные 54
 кремнистые 13
 магматические 42
 метаморфические 42
потенциал гидроэнергетический 154
потерна
 дренажная 123, 126
 смотровая 123

цементационная 26, 28, 90, 102, 123, 126
продукты искусственной цемента-
ции 37, 40, 154, 156
проницаемость остаточная 32
пространство интермицеллярное
45, 57, 94, 134
противодавление 24, 28
процесс
 биогеохимический 149, 153
 гипергенный 39
 микробиологический 42
прочность закрепления 36, 37
пуазелевское течение 108
пьезометр 24-28, 90-93, 119-123, 126,
127, 157

Работы опытно-фильтрационные 19
радиус закрепления 34, 36
разбавление 10, 34, 35, 40, 45, 48, 49,
61, 62, 64, 67-72, 94, 95, 107-109, 111,
112, 117, 127
разгрузка субаквальная 21
разложение микробиологическое 148
рассолы сероводородные 23
раствор
 акрилсиликатный 36
 гелеобразующий 9, 10, 45, 72, 134,
153, 156, 157
 коллоидный 28, 55
 полиуретановый 35
 поровый 38, 95
 химический 33-35, 42, 154, 155,
157, 160
 целлюлозы медно-аммиачный 35
 цементный 9, 24, 33, 101, 154, 157,
160
 цементный суспензионный 9, 24
расходомер 107
реакция
 гетерогенная 41

Лизеганга 60
обменная 44
ритмическая 60
топохимическая 99, 100
химическая гетерогенная 41, 43
ров карстовый 12
рост кристаллов 58-60, 72, 73, 79, 80,
87-89, 134

Светодиод 106
свойства
 деформационные 36
 прочностные 36, 37, 57
седиментация 55
седиментогенез 16
селенит 16, 21, 102
сера 150
сероводород 27, 42, 150, 151
силикат кальций-магниевый 58
силикатизация 33, 36-38, 89, 134, 148
силикатизация однорастворная 36
силикатный модуль 88
силы
 адсорбционные 57
 гравитационные 55
сильвин 154
синерезис 37, 57
система техногенно-геохимическая
39, 118, 120, 130, 132, 148, 157, 159
скелет геля 45, 57, 58, 60, 70, 78, 84,
88, 134
скорость
 диффузии 58, 88, 96, 128
 миграции 42
 растворения 43, 48, 98-100, 102,
114, 117, 134
 фильтрации 9, 34, 35, 51, 100
 фильтрации действительная 48
смола
 карбамидная 37, 38
 резорцино-формальдегидная 35

- эпоксидная 35, 79-81, 155, 157
смолизация 37
соли
 азотнокислые 98
 двух- и трехвалентных металлов 37, 55, 56
сорбция 36, 54
сосуд Мариотта 84, 106
способность коагулирующая 55, 70
среда
 Виноградского 149, 150
 геологическая 118, 163
 окружающая 41, 46, 165
ствол шахтный 33
структуры колломорфные 54
суглинки лёссовидные 38, 95
сульфат кальция 16, 17, 20, 24, 69, 71, 96, 99, 103
сульфатредукторы 150, 151
сульфид 150, 151
сушка сублимационная 68, 150
схема Булевская 68
счетчик импульсов 106
- Течение пуазелевское** 108
тиосульфаты 151
трещиноватость 9, 19, 21, 96
ТЭГ-1 35, 79, 155, 157, 158
- Углеводороды тяжелые** 27
углеводы 151
углекислый газ 27, 54, 61, 100, 106
уравнение тепломассопереноса 34
условия анаэробные 150
устойчивость плотины 9, 28, 132, 134
- Фенол** 54
флюиды техногенные 156
формула Пуазеля 108
фотодатчик 106
фотодиод 106, 107
- ФРЭС** 35, 155
фундаментостроение 33
функция ступенчатая 159
- Хемосорбция** 58, 88, 134
хром 44
- Целлюлоза** 35, 54
цемент
 портландский 23
 сульфатостойкий 23
цементация 23, 24, 29, 33-35, 37, 38, 40, 54, 90, 105, 134, 154-156, 160
ценность эвристическая 39
цеолит 72
- Чашка Петри** 149, 150
- Штамм**
 активный 149
 коллекционный 151
- Энергия кристаллической решетки** 43, 98
эрозия 19
эффект тампонажный 28, 72, 95
эффективность закрепления 33, 34, 39, 46
- Явления биогеохимические** 148
- Desulfovibrio* 150
Desulfotomaculum 150
- p-n переход 107

СПИСОК ГЕОГРАФИЧЕСКИХ НАЗВАНИЙ

Австралия	5	Европейская часть	173
Австрия	4, 97, 166	Европейский Север	187
Айова	97	Европейский северо-восток России	185
Алжир	155	Западный Кавказ	175
Америка	5	Западный Урал	143, 164, 168, 170, 179, 180-183, 185, 188-194
Ангара	97, 209	Ирак	97, 209
Аргентина	97	Ирень	97
Армения	101	Испания	97
Афины	166	Италия	6, 166
Африка	5	Кавказ	192
Базель	97, 209	Казахстан	6
Баренц-регион	187	Калифорния	53, 97, 209
Бари	166	Кама	11, 184
Башкирия	179	Камбарка	165
Бирс	97, 209	Камский бассейн	173
Болгария	5, 7, 166	Камское водохранилище	11, 165, 169-172, 174, 195
Боулинг Грин	166	Канада	6
Бразилия	166	Каталония	97, 209
Бриньоль	96	Кентукки	167, 194
Будапешт	166	Киев	7
Бурятия	5, 165, 189	Кизеловский район	181
Вахш	7, 9, 97, 209	Кизеловский угольный бассейн	165, 172, 177-184, 191-197
Великобритания	5, 8, 166	Кизнер	165
Венгрия	177	Кизнерский район	189
Венесуэла	97	Киргизия	6
Верхнекамье	191	Китай	4, 6, 35, 97, 155
Вишера	181-184	Косьва	182, 184
Вишерский заповедник	187	Красноярский край	5, 165
Владимирская область	5	Кунгур	166
Восток России	178, 188	Кунгурская пещера	172, 182, 183, 186, 190, 192-194
Гарц	97, 209	Кунгурский район	168
Гватемала	97	Курганская область	5, 165, 185, 188, 190
Германия	4, 6, 97	Курганское Зауралье	191, 193, 197
Губаха	172	Ленинград	7
Губахинский район	180		
Дальний Восток	178		
Дурбан	166		
Душанбе	7, 163		
Европа	5		

Лиссабон	166	Северный Урал	181, 183
Литва	6	Сен-Бом	96, 209
Миасс	166	Сингапур	166
Москва	7, 166	Сицилия	97
Неккар	97	София	166
Нечерноземный Урал	170, 172	Средняя Азия	167
Нечерноземье	143, 168, 173	СССР	5, 7, 35, 96, 137, 140, 155, 164, 166, 168, 172-175, 178, 209
Нигерия	35, 155	США	4-6, 35, 97, 154, 155, 164, 166, 167, 194, 209
Новосибирск	7	Таджикистан	6, 8, 9, 163, 165, 209
Нойкирхен	166	Ташкент	7
Ноттингем	166	Тбилиси	7
Нью-Мексико	97, 209	Техас	97
Огурдино	188	Тульва	167
Озерное месторождение нефти	184	Тюменская область	5, 165
Оклахома	97, 209	Удмуртия	5, 165, 189
Ординская пещера	195	Урал	137, 141, 172-174, 178, 181, 184, 187, 194, 196
Оса	97, 209	Уральский регион	174, 188, 193
Пенза	165, 187	УССР	176
Пензенская область	5	Усть-Кишерть	168
Пермский край	4, 5, 97, 140, 163-165, 172, 177-181, 184, 191	Франция	4, 96, 97, 101
Пермское Прикамье	177, 186	Хабаровский край	5, 165
Пермское Приуралье	11, 184	Ханты-Мансийский автономный округ	5
Пермь	11, 163, 165, 166	Холбольджинский угольный разрез	178, 189
Перу	97, 209	Челябинская область	5
Пещера геологов-2	168	Чехия	6
Полазна	194	Чумлякское месторождение подземных вод	185
Полазненский участок	170	Чусовая	11, 12, 137, 185
Полазненское месторождение нефти	193	Чусовской мыс	11
Поморье	187	Щучанский район	185
Прикамье	178, 187	Щучье	165
Прованс	96, 209	ЮАР	166
Раздан	97, 135	Южная Корея	6, 166
Рига	7	Южно-Уральский регион	180
Рио-де-Жанейро	166	Япония	6
Россия	4, 6, 7, 33, 164, 166, 181, 187, 191		
Ростов-на-Дону	7		
РСФСР	176		
Самчхок	166		
Свердловская область	5		

СПИСОК ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Авалон	97	Олив-Хиллс	97, 209
Аллоз	97	Пебль де Пава	97
Альтер-Штольберг	97, 209	Перепадная ГЭС	155
Асуанская плотина	33, 38, 142	Печенегский гидроузел	34
Байпазинская ГЭС	97	Позкос	97, 209
Брентли	97	Рава	97
Бу-Ханифия	155	Редрок	97, 209
Буэно Виста	97	Риан	96, 209
Гриб	155	Рогунская ГЭС	7, 9, 79, 80, 97, 137, 154-163, 167, 209
Дербенди-Хан	97	Рэтлснейк	97, 209
ДнепроГЭС-2	34	Сангтудинская ГЭС	9, 7, 97, 165
Докан	97	Сан-Фернандо	97, 209
Драй Каньон	97	Сен-Лоран	97, 209
Ереванская ГЭС	97	Сентфордская плотина	97
Жела	97	Сент-Френсис	97, 154, 209
Ирганайская плотина	97	Серебрянская ГЭС-2	34
Каза де Пиедра	97	Тартар	97
Кайнджи	155	Тбилисская плотина	97
Кастейк	97	Титон	97
Коунас-Форд	155	Фатха	97
Красноярская ГЭС	38	Фенгтан	155
Кротон	33	Фодда	155
Куайл Крик	97	Фонтанелле	97
Магнитогорская ГЭС	33	Хадита	97
Максимильян	97, 209	Хесигхейм	97
Мозес Сандерс Тауэ	97	Хит	97
Монт Сенис	97	Хондо	97, 209
Мосул	97	Хуошипо	97
Нурекская ГЭС	9, 209	Ченцун	155
Нижне-Каферниганская плотина	8, 97, 154, 163	Эль Изиро	97

SUMMARY

The presence of soluble rocks, such as gypsum and rock-salt, in the foundations of hydraulic structures cause engineering geological conditions that are difficult and unfavorable for safe construction. In the former USSR, the total area of gypsum-bearing rock extends to about 5 million km² [43]. Hydrotechnical construction in such soluble rock regions can create conditions of enhanced dissolution and karst development that can threaten the structures. Throughout the world there are examples where the dissolution of gypsum in dam foundations have resulted in tragic consequences. The failure of the St. Francis dam in California, USA, is one catastrophic example where 400 people perished as a result. Numerous problems are associated with dams on gypsum, these include settlement, cracking and seepage with the constant threat of failure or expensive remediation. For example, in the vicinity of Basel, on the Birs River, the dissolution of gypsum beds in the dam foundation caused settlement and cracking. Settlement was also observed on the San Fernando, Olive Hills, and Rattlesnake dams in California. Loss of water from reservoirs on gypsiferous rocks is common and seepages through the dam foundations were recorded on the Osa River (Angara basin), in Oklahoma and New Mexico (USA). Seepage and gypsum dissolution causes cavities to form and these features have been found in the foundations of the Hondo, Maximilian, and Red Rock dams, along with a dam in the Caverly valley, Oklahoma. Gypsum also occurs in the foundations of the San Loran dam in Catalonia, Poecos dam in Peru, and a number of dams in Iraq [184, 185]. In a number of cases, the presence of gypsiferous rocks resulted in the rejection of the dam site for construction, an example being the Saint Baume dam in Provence, which was found to be on gypsiferous marls. Surveys for the Rian dam in the vicinity of Alter Stolberg, south of Harz, stopped after gypsum was discovered in the foundation zone. Gypsum has been proved in the foundations of more than 50 dams and rock salt, which is more soluble, has been found in the foundations of others including the Rogunskaya and Nurekskaya dams on the Vahsh River in Tajikistan.

The rate at which the rock dissolves is dependent on the amount of seepage through the rock. One way to reduce this water movement is to create a grout curtain. In jointed rocks the grout curtains are created by injecting a cement or cement-clay grout that makes it possible to reduce the specific water seepage to 0.1-0.05 liter/min. Lower values cannot be obtained because cement suspension grouts cannot penetrate into cracks which are less than 0.1 mm wide. The operation of the Kama hydroelectric power station showed, that these residual cracks allowed water seepage and leaching of the gypsum to occur. This dissolution and increasing joint size caused a drop in the percentage reduction of head on the grout curtain in some zones to as little as 2-4% compared with a design value of 33%.

To increase the density of grout curtains made in finely jointed gypsiferous rocks, chemical gel-forming solutions with a penetration capability close to that of water have been recently introduced. One such solution, an oxaloaluminosilicate, was developed by the group at the Problem-Solving Laboratory, Geology Department, MSU. It was used for additional solidification of the grout curtain in the jointed gypsiferous rocks in the foundations of the Kama hydroenergetic power station. The solution comprises two components — sodium silicate with a density of 1.19 g/cm^3 and a hardener. The complex hardener is an aqueous solution of aluminum sulfate and oxalic acid [18]. As a result of using the oxaloaluminosilicate solution the specific seepage through the curtain does not exceed 0.005 liter/min . This improved the head reduction at the grout curtain and increased the dam stability to a safe level.

The use of chemical reagents for grouting raised the question of their effect on the stability of gypsum. Such an effect, in addition to the direct contact of the gel with the rock, occurs beyond the limits of the stabilization zone. This is because during injection the peripheral parts of the chemical gel-forming solutions are diluted with water to the extent that they cannot form a gel. The seepage carries these diluted chemicals beyond the limits of the curtain where during the movement they undergo further dilution. Consequently, solutions of variable dilutions are brought into contact with a large surface area of the gypsum rock. Components of the injection solution also pass from the gel grout into the seepage flow by diffusion and these can impact on the gypsum.

It was established that solutions containing components of the oxaloaluminosilicate formulation have a beneficial effect on interacting with gypsum. Not only do the chemicals not dissolve the gypsum, but they also form a protective surface film of calcium oxalate and calcium hydrosilicates that are difficult to dissolve; these films protect the gypsum from dissolution.

The use of the oxaloaluminosilicate solution for the additional solidification of the rocks in the foundations of the Kama hydroelectric power station has been beneficial. This experience allows the recommendation of this solution for widespread use for making grout curtains in finely jointed rocks containing gypsum.

A further study of the neoformations being formed by seepage of the oxaloaluminosilicate and silicate solutions (especially at large dilutions), suggests that these solutions could be used as prospective additives to clay, clay-cement, and cement grouts when stabilizing gypsiferous rocks.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО	5
ОТ АВТОРА	7
ВВЕДЕНИЕ	9
1. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЙОНА СТВORA КАМСКОЙ ГЭС	
1.1. Геологическая характеристика района	11
1.2. Необходимость проведения дополнительных мероприятий по защите гипса от растворения	23
1.2.1. Эффективность работы противofильтрационных устройств	23
1.2.2. Изменение гидрогеологических условий после создания плотины	25
1.3. Доуплотнение цементационной завесы шавелевоалюмосиликатным раствором и схематизация постинъекционных условий	27
2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОСТИНЪЕКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ	
2.1. Взаимодействие техногенных растворов с грунтом в ходе инъекции	33
2.2. Факторы, определяющие интенсивность постинъекционных процессов	42
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИЛИКАТНЫХ РАСТВОРОВ И ГЕЛЕЙ С МИНЕРАЛИЗОВАННЫМИ ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ	
3.1. Основные свойства природных и искусственных силикатных водных растворов	51
3.2. Структура и свойства силикатных гелей	56
3.3. Исследования взаимодействия шавелевоалюмосиликатного зoля с подземными водами	60
3.4. Исследование взаимодействия шавелевоалюмосиликатного геля с растворами электролитов	72
3.5. Формирование техногенных вод на участке завесы	90
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОСТИНЪЕКЦИОННЫХ РАСТВОРОВ С ГИПСОМ	
4.1. Гипсоносные породы как основания плотин	96
4.2. Особенности взаимодействия гипса с растворами электролитов	98
4.3. Взаимодействие гипса с силикатсодержащими растворами	101
5. ВЛИЯНИЕ ПОСТИНЪЕКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА КАЧЕСТВО ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ЗАВЕСЫ В ГИПСОНОСНЫХ ПОРОДАХ	
5.1. Закономерности формирования техногенно-геохимических систем	118
5.2. Изменение фильтрационных параметров пород на различных этапах развития техногенно-геохимических систем	120
5.3. Влияние изменения качества завесы на устойчивость Камской ГЭС	130
ВЫВОДЫ	133
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	135
ПУБЛИКАЦИИ В РАЗВИТИЕ ПРОБЛЕМЫ	148
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ	163
ХРОНОЛОГИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ТРУДОВ	167
ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ	198
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	200
СПИСОК ГЕОГРАФИЧЕСКИХ НАЗВАНИЙ	206
СПИСОК ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ	208
SUMMARY	209

Научное издание

Максимович Николай Георгиевич

**БЕЗОПАСНОСТЬ ПЛОТИН НА
РАСТВОРИМЫХ ПОРОДАХ
(на примере Камской ГЭС)**

Редактор *Л.П. Сидорова*

Корректор *Л.П. Северова*

Компьютерное исполнение *С.В. Казакевич*

Подписано в печать 05.10.2006.

Формат 70 x 100/16. Бумага ВХИ

Гарнитура NewtonС. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,32. Уч.-изд. л. 15

Тираж 500 экз. Заказ № 2360/2

Редакционно-издательский отдел
Пермского государственного университета
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

Издание отпечатано в ООО ПС «Гармония»
614000, Пермь, ул. Кирова, 34.