

ISSN 0869-7803

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГЕО ЭКОЛОГИЯ

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ
ГИДРОГЕОЛОГИЯ
ГЕОКРИОЛОГИЯ

3

1995

ГЕОЭКОЛОГИЯ

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ.
ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ

ЖУРНАЛ ОСНОВАН В ЯНВАРЕ 1979 ГОДА

3 • 1995

(до 1993 г. назывался «Инженерная геология»)

ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД

май — июнь

МОСКВА «НАУКА»

СОДЕРЖАНИЕ

Чистяков А. А., Клубов С. В., Востоков Е. Н., Улицкий Ю. А. Геоэкологические особенности современного осадконакопления речных дельт и эстуариев
 Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н. Современные проблемы изучения и моделирования миграции подземных вод и массопереноса, геохимические принципы

3

12

Геоэкологические проблемы урбанизированных территорий
и исторических памятников

Бахирева Л. В., Заиканов В. Г., Качесова Л. П., Минакова Т. Б., Москаленко Н. Н.,
 Просунцова Н. С., Смирнова Е. Б., Чернышова Г. М. Опыт геоэкологических оценок
 урбанизированных территорий
 Езерский М. Г., Якубов В. А. Решение инженерно-геологических задач геофизическими методами на участке Рязанского кремля

23

33

Геоэкологические проблемы захоронения
и утилизации отходов

Гольдберг В. М. Гидрогеологическое обоснование размещения полигонов промышленных отходов
 Грибанова Л. П. Проблема захоронения и утилизации твердых бытовых отходов в Московском регионе
 Виллевальд Р. С. Управление и нормативно-правовое регулирование обращения с твердыми промышленными и бытовыми отходами

43

50

56

Грунтоведение

Брушков А. В. Динамика влаги в мерзлых грунтах при воздействии постоянного температурного градиента
 Гамаюнов Н. И. Электромагнитная обработка растворов и суспензий

60

68

Природные и природно-техногенные процессы

Рудько Г. И., Лопатинский Г. С., Рябов Н. С. Закономерности развития и активизации оползней в северо-восточном Предкавказье
 Агафонов Б. П. Геодинамические условия долины р. Витим в районе створа Мокской ГЭС

80

89

Загиров Ш. Ш. О сопоставимости результатов определений характеристик грунтов различными методами 98

Обсуждаем нормативные документы

Зиангиров Р. С., Трофимов В. Т. Принципиальные вопросы построения общей классификации грунтов (к пересмотру ГОСТа 25100-82. Грунты. Классификация) 103

Хроника

Научный семинар «Экология военных территорий» 110

CONTENTS

Chistyakov A. A., Klubov S. V., Vostokov E. N., Ulitsky Yu. A. Geoecological peculiarities of modern sedimentation in river valleys and estuaries 3
Krainov S. R., Ryzhenko B. N. Geochemical principles and modern problems of study and modelling of underground water migration and mass transfer 12

Geoecological Problems of Urbanized Areas and Historical Monuments

Bakhireva L. V., Zaikanov V. G., Kachesova L. P., Minakova T. B., Moskalenko N. N., Prosuntsova N. S., Smirnova E. B., Chernyshova G. M. Experience in geoecological assessment of urbanized areas 23
Ezersky M. G., Yakubov V. A. Solution of engineering geological tasks by geophysical methods at the Ryazan kremlin site 33

Geoecological Problems in Waste Disposal and Utilization

Goldberg V. M. Hydrogeological substantiation for location of industrial waste disposal sites 43
Gribanova L. P. Solid domestic waste disposal and utilization in Moscow region 50
Vellevald R. S. Management and legal control of solid industrial and domestic waste treatment 56

Soil and Rock Engineering

Brushkov A. V. Moisture dynamics in permafrost rocks under influence of permanent temperature gradient 60
Gamayunov N. I. Electromagnetic processing of solutions and suspensions 68

Natural and Natural Technogenic Processes

Rudko G. I., Lopatinsky G. S., Ryabov N. S. Mechanism of landslide development and activation in the north-east Caucasus foothills 80
Agafonov B. P. Geodynamic conditions of the river Vitim valley in the Mokskaya hydroelectric power plant location 89

Research Methods and Techniques

Zagirov Sh. Sh. On the agreement of soil characteristics determined by different methods 98

Deliberations on Specification Documents

Ziangirov R. S., Trofimov V. T. The principle issues of soil general classification (to the revision of All-Union State Standard 25100-82. Soils. Classification) 103

Chronicle

Scientific seminar «Ecology of military areas» 110

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

3 . 1995

УДК 551.482.6

© 1995 г. А. А. ЧИСТИЯКОВ, С. В. КЛУБОВ, Е. Н. ВОСТОКОВ,
Ю. А. УЛИЦКИЙ

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ РЕЧНЫХ ДЕЛЬТ И ЭСТУАРИЕВ

Речные дельты и эстуарии являются участками наиболее благоприятными для загрязнения в прибрежной зоне морей и океанов. Огромное количество загрязняющих веществ поступает в них с речным стоком и другими путями. Дельты и в особенности эстуарии служат весьма эффективными седиментационными ловушками с высокими скоростями осадконакопления. Поэтому в них отлагается подавляющая часть поступающих наносов. Загрязнение дельт и эстуариев в зависимости от различных факторов, главным образом гидродинамических, происходит неравномерно в их различных частях. Наиболее опасна для загрязнения зона смешения пресных речных и соленых морских вод, где кроме гидродинамического и геохимического формируется биологический барьер. Районирование дельт и эстуариев по степени возможного загрязнения их отдельных участков позволяет решить целый ряд задач при их хозяйственном освоении.

Дельты и эстуарии формируются в местах впадения рек в морские водоемы и могут занимать до одной трети протяженности береговой линии, что имеет место на побережьях России. Экологическая роль дельт и эстуариев очень велика, так как в их пределах отлагается до 90% вредных веществ, выносимых реками. Это связано с тем, что на границе река — море, являющейся своеобразным гидродинамическим и гидрохимическим барьером, в пределах дельт и эстуариев происходят быстрые и существенные изменения динамических, физико-химических и биологических свойств водных масс, а также мощная аккумуляция влекомых и взвешенных наносов. Эстуарии и дельты являются участками максимального осадконакопления терригенного материала в прибрежной зоне континентальных окраин. Именно в них отмечаются и наибольшие скорости современного осадконакопления, что способствует загрязнению.

По современным оценкам [4, 6, 15, 16], с речным стоком в Мировой океан ежегодно поступает $2 \cdot 10^{10}$ т взвешенных веществ, включая тяжелые металлы и органические загрязняющие вещества в растворенной форме, а также в ассоциации со взвешенными частицами. Речной сток содержит значительное количество взвешенного органического вещества, которое часто соизмеримо с его первичной продукцией. Вблизи плотно населенных районов количество биогенных элементов, особенно нитратов и фосфатов, в речных водах очень высокое [14]. В последнее десятилетие в связи с употреблением детергентов и минеральных удобрений произошло значительное увеличение их содержания. Так, например, в Дунае концентрация нитратов и фосфатов возросла в 10 раз. В связи с антропогенным воздействием речной вынос азота в океан увеличился в 5 раз, а фосфора в 4 раза. С речным стоком поступает и огромное количество следовых металлов, причем в ряде случаев антропогенный сток металлов превышает сток металлов из природных источников. Особого внимания заслуживает тот факт, что при разрушении органического вещества металлы могут освобождаться и оседать на поверхность донных осадков. Согласно современным представлениям [5], большинство компонентов растворенного органического вещества речных вод не

достигает открытого моря и осаждается на дно в дельтах и эстуариях. В открытый океан переносится лишь 1—2% от общего содержания биогенных элементов в речной воде. Ассимиляционная емкость экосистем дельт и эстуариев определяется в основном гидродинамическими и седиментационными процессами.

При попадании в морскую воду в дельтах и эстуариях взвешенные частицы наносов и загрязняющие вещества встречаются с новыми условиями: изменяется концентрация солей, pH, окислительно-восстановительный потенциал и др. В результате этого одновременно или последовательно происходит целый ряд процессов: окисление или восстановление элементов в ионной или молекулярной формах на частицах, коагуляция (рост частиц путем взаимопроникновения) и флоккуляция (агрегация частиц путем прилипания). Все это приводит к усилению процессов седиментации взвешенных частиц, десорбции адсорбированных элементов, а также к растворимости некоторых поверхностно-активных материалов, которые затем адсорбируются на поверхности взвешенных частиц либо на поверхности воды — воздух. В результате этих процессов происходит образование зоны химической трансформации в водной толще краевых частей дельт и эстуариев, куда проникают морские воды.

В связи с высокими скоростями седиментации загрязнение дельт и эстуариев вызывает активное накопление загрязняющих веществ в донных осадках. Коэффициенты накопления некоторых металлов и высокомолекулярных органических соединений в донных осадках во много раз больше, чем в водной толще и живых организмах. Под влиянием биологического взмучивания эти загрязняющие вещества проникают в глубь осадков и полностью захороняются. Распространение и накопление загрязнителей в дельтах и эстуариях тесно связано с современными процессами седиментации, обусловленными главным образом гидродинамическим режимом, характерным для их различных частей.

Загрязнения резко отличаются в дельтах и эстуариях и поэтому разбираются отдельно. Первыми рассматриваются дельты как наиболее важные и крупные объекты.

Речные дельты, расположенные при впадении крупных рек в океаны и моря или внутренние водоемы, с древних времен играли важную роль в развитии человеческого общества. Относительно благоприятные климатические условия, достаточное количество влаги, плодородные почвы, обилие рыбы, водоплавающей птицы и зверя в дельтах засушливой, полузасушливой и тропической зон послужили причиной их заселения и освоения. Важнейшая роль принадлежит дельтам в поддержании экологического равновесия на обширных территориях суши и акваториях морей. В ряде дельт появились крайне отрицательные последствия искусственного уменьшения и регулирования речного стока. В некоторых дельтах началась деградация уникальных природных комплексов.

В Российской Федерации особенно активно используются дельты рек Волги, Терека, Кубани, Дона и других. В настоящее время разрабатываются проекты комплексного использования и охраны земельных и водных ресурсов дельт многих рек. Дельты ряда рек России оказываются в зоне крупных водохозяйственных мероприятий в бассейнах рек, включая регулирование, изъятие, перераспределение стока. Для целей водного транспорта планируется расширение использования дельт Северной Двины, Печоры, Оби, Енисея, Лены, Яны, Индигирки и др. Освоение дельт рек постоянно расширяется и в других странах.

Все факторы, влияющие на формирование и режим дельт, а также процессы их загрязнения подразделяются на природные (естественные) и антропогенные. Среди природных факторов можно выделить три основные группы: 1) речные, 2) морские, 3) общие физико-географические и геологические [9].

Главнейшим из речных факторов является сток воды и наносов, оказывающий наибольшее влияние на динамику гидрографической сети устья реки и процессы дельтового осадконакопления, непосредственно связанные с загрязнением. Сток воды противодействует проникновению в дельтовые водотоки приливных и на-гонных колебаний уровня осолоненных вод взморья, которые способствуют выпа-

дению загрязняющих веществ. Изменение ландшафта и экологических условий отдельных частей дельты происходит вследствие изменения либо стока всей реки, либо стока соответствующей системы дельтовых водотоков.

Из морских факторов важнейшим является уровень приемного водоема, который существенно влияет на русловые процессы в дельтовых водотоках. Многолетние его колебания вызывают усиление либо эрозионных (при понижении), либо аккумулятивных (при повышении) процессов на устьевом участке реки, что оказывает существенное влияние на осадконакопление и загрязнение. Сезонные колебания уровня воды на взморье в целом слабо влияют на динамику дельты, но являются причиной изменения физико-химических и гидробиологических свойств водных объектов дельты, особенно в ее приморской зоне. Это весьма важно при оценке возможного загрязнения краевых частей дельт.

Из физико-географических факторов на процессы дельтообразования наиболее существенное влияние оказывает климат, который определяет ветровые условия и через них влияет на режим волнения и течений, а также на развитие эоловых процессов в дельтах. Климатические условия влияют также на развитие почвенно-растительного покрова и, следовательно, на природные условия дельты в целом. Из геологических факторов формирования дельты наиболее важными оказываются режим неотектонических движений и литологический состав коренных пород.

Антропогенные факторы представляют собой довольно сложный комплекс водохозяйственных мероприятий и объектов энергетического, сельскохозяйственного, промышленного, воднотранспортного, рыбохозяйственного, коммунального и дорожно-транспортного назначения. Хозяйственная деятельность человека может влиять на устьевые процессы непосредственно — при водохозяйственных мероприятиях в устьевой области реки и косвенно — через изменение речных и морских факторов, процессов дельтообразования [7].

По своему воздействию на гидрологический режим дельты все водохозяйственные мероприятия в устье реки можно классифицировать следующим образом: 1) приводящие к подъему уровня воды выше по течению (обвалование, искусственное удлинение устья и др.); 2) способствующие понижению уровня воды выше по течению (углубление рукавов, дна устьевого взморья, направление рукавов и др.); 3) ведущие к перераспределению стока по пространству дельты (полное или частичное перекрытие рукавов, сооружение каналов и др.).

Дноуглубительные работы, строительство мелиоративных каналов, обвалование водотоков, сооружение рыбоходов на взморье приводят к искусенному повышению мутности дельтовых проток и рукавов и их загрязнению [10, 11, 13].

Распределение стока воды, наносов, биогенных веществ и загрязнителей по пространству дельты всецело зависит от строения ее гидрографической сети. Изменения строения гидрографической сети дельты влекут за собой перераспределение зон обводнения дельты и зон отложения речных наносов. Это в свою очередь оказывает решающее влияние на загрязнение, развитие почвенно-растительного покрова, а также на возможность хозяйственного использования природных ресурсов отдельных районов дельты (рыбное и сельское хозяйство, судоходство и др.).

По особенностям строения гидрографической сети выделяются три главных типа дельт. Первый тип представляет собой систему разветвляющихся в сторону моря рукавов и характеризуется большим количеством речных устьев. Для второго типа характерна разветвленная система соединяющихся русел и несколько активных речных устьев. Дельтовая гидрографическая система третьего типа состоит из одного или нескольких рукавов, которые берут начало приблизительно в одной точке, в головной части дельты. В первом типе основная масса загрязнителей будет осаждаться в краевой части дельты, в местах ветвления рукавов. Для второго типа будет характерно более или менее равномерное распределение загрязняющих веществ по всей поверхности дельты. В дельтах третьего типа основная масса загрязнителей будет выноситься на предустерьевое взморье.

В загрязнении дельт большую роль играют процессы современного осадконакопления, которые в зависимости от преобладания различных факторов или их сочетания существенно отличаются в их различных частях. По особенностям гидродинамических условий осадконакопления в дельтовых областях можно выделить следующие характерные участки: 1) приустьевой участок реки, где на обычный гидрологический режим русловых водных потоков начинают воздействовать колебания уровня приемного водного бассейна, вызываемые приливами и ветровыми нагонами; 2) устьевой участок реки или собственно дельта, где динамику вод и наносов определяет взаимодействие водных масс реки и приемного бассейна, но речные факторы имеют преобладающее значение; 3) предустьевое взморье или авандельта, где происходит обмеление моря за счет поступления речных наносов, но ведущими уже являются морские факторы. Выделенные участки характеризуются весьма специфическими процессами осадконакопления, обусловленными постепенным переходом гидравлического режима реки в гидродинамический режим приемного бассейна. Для них характерны как элементы речного режима (русовые процессы, изменчивость стока воды и наносов и т. п.), так и элементы морского режима (приливы и ветровое волнение, течения, соленость вод, вдольбереговой поток наносов и т. п.).

На приустьевых участках рек, где хотя и оказывается влияние приливов и нагонов, ведущим фактором осадконакопления является деятельность русловых потоков, формирующих разнообразные аллювиальные отложения. Большая пропоность вод не способствует загрязнению на этих участках.

В пределах собственно дельты русловые процессы уже весьма существенно зависят от приливно-отливных и сгонно-нагонных колебаний уровня приемного водоема, заметно влияющих на формирование аллювиальных фаций. Здесь происходит активная аккумуляция осадочного материала, с которым могут отлагаться и загрязняющие вещества. По имеющимся подсчетам [8, 9], здесь отлагается примерно половина приносимых рекой наносов и большая часть загрязнителей.

Воздействие приливов и нагонов прежде всего вызывает подпор речного течения, а при проникновении морской воды в устье сначала в виде придонного клина, а потом и по всему сечению — изменение внутренней структуры течений. В максимум приливов или сильных нагонов в дельтовых рукавах на какое-то время формируются подпорные участки, где течение вообще отсутствует. Под воздействием галоклина речная струя теряет контакт с дном, и в этом створе начинается массовое осаждение частиц наносов, приводящих к формированию фации приливного подпора, сложенной тонкими осадками с горизонтальной слоистостью. В связи с тем, что клин соленых вод при приливном подпоре захватывает в крупных рукавах в основном только придонные части живых сечений потоков, мелкозернистые взвешенные наносы здесь почти не отлагаются и выносятся вниз по течению. Только небольшое количество глинистых частиц в зоне приливного подпора накапливается вследствие флоккуляции (выпадение в виде хлопьев) в соленой воде. Ниже по течению, где соленая вода может занимать большую часть живых сечений потоков, вследствие коагуляции происходит интенсивное осаждение мелкодисперсных фракций речных наносов, которое может привести к заилиению и загрязнению русел.

В пределах наземной дельты зона проникновения соленых приливных и нагонных вод, где создается своеобразный гидродинамический и в особенности гидрохимический барьер, является благоприятной для осаждения как природных, так и техногенных загрязняющих веществ.

Предустьевое взморье или авандельта является зоной, где заканчивается переход гидрологического режима реки в гидродинамический режим приемного бассейна. Здесь происходит отложение основной массы речных наносов, которые образуют специфические аккумулятивные формы в виде устьевых баров. В пределах предустьевого взморья отмечаются наибольшие пространственно-временные изменения всех гидролого-гидрохимических характеристик, которые здесь на два-три порядка больше, чем в прилегающих участках моря. Все это несомненно

оказывает существенное влияние на процессы загрязнения предустьевых взморий. Большую роль в преобладании морских или речных факторов играет уклон дна взморья. На приглубом взморье преобладают морские факторы (волны, течения), под воздействием которых обычно происходит наращивание морского края дельты и вынос значительной части аллювиального материала и загрязняющих веществ за пределы устьевой области. На отмелом взморье решающую роль играют речные факторы, формирующие «русловой», сильно расчлененный морской край дельты с многочисленными заливами. Дельтовые заливы с застойными водными условиями весьма благоприятны для накопления загрязняющих веществ [3, 11].

При растекании речной струи на взморье почти всегда происходит плотностная стратификация, так как речная вода даже при максимальном насыщении наносами практически во всех случаях легче морской воды. Большое расхождение в плотности между речными потоками и морской водой приемного бассейна является причиной того, что менее плотная речная вода проникает далеко в море по поверхности соленых вод и образует боковые разводья. На поверхности контакта пресных и соленых вод возможно образование внутренних волн с большими амплитудами, которые способны перемещать осадочный материал и загрязнители. В струе речной воды, вышедшей на взморье, происходит одновременно и перенос частиц вместе с загрязняющими веществами дальше в море, и их осаждение. После пересечения выпадающей частицы наносов границы контакта пресной речной струи и морской воды происходит почти вертикальное выпадение частицы. Выпадение частиц начинается в створе устьевого бара или в поперечном сечении, где происходит отрыв струи от дна. Крупные наносы, влекомые по дну или перемещающиеся в придонном слое, осаждаются непосредственно у устьевого бара, вызывая в паводок его перемещение в море. Взвешенные наносы переносятся еще на некоторое расстояние от устьевого бара в сторону моря, где они формируют продельту.

Мористее устьевых баров располагается зона интенсивного смешения пресных речных и соленых морских вод, часто совпадающая на открытом устьевом взморье со свалом глубин. Свал глубин является границей распространения влекомых наносов в виде аккумулятивных форм и обычно слагается пестрыми отложениями, отражающими сезонные колебания стока. В зоне смешения пресных и соленых вод происходит коагуляция и накопление тонких взвешенных наносов, что приводит к обогащению свала глубин глинистым материалом, с которым выпадает и большая часть загрязнителей.

Большинство эстуариев образовалось в результате подтопления речных долин при послеледниковом повышении уровня океана (до 100 м) или вследствие формирования барьерных кос и островов вдоль морских берегов. Эстуарии представляют собой полузамкнутые прибрежные водоемы, в которых происходит смешение пресных речных и соленых морских вод [17]. С гидрологической точки зрения эстуарий — это тело воды, открытое в океан с одной стороны и соединяющееся с рекой с другой. Главной отличительной чертой эстуариев является присутствие в них пресных речных вод (плотность 1 г/см³) и соленых морских вод с плотностью 1,025 г/см³. Вследствие различия в плотностях эти две жидкости стремятся выделиться как самостоятельные водные массы с более плотной морской водой у дна, перекрываемой сверху пресными водами.

Эстуарии, как и дельты, являются зонами активного взаимодействия морских и речных процессов. Поэтому в эстуариях процессы загрязнения и осадконакопления определяются следующими гидродинамическими факторами: 1) морским волнением; 2) приливными колебаниями уровня воды и индуцированными ими течениями; 3) речным стоком; 4) плотностной стратификацией вод; 5) ветровыми течениями; 6) внутренними волнами [12].

В придонном слое большинства эстуариев существует довольно протяженная зона встречного движения воды в сторону суши, тогда как на поверхности преобладает сток в море. В верхнем слое при существовании плотностной

стратификации происходит устойчивое удаление взвеси и загрязнителей из эстуариев в морской бассейн. Придонное перемещение наносов вверх по эстуарию возникает вследствие преобладания у дна приливных скоростей над отливными. В момент наиболее высокого прилива вода в эстуарии застойная, практически без течений на протяжении 8—10 ч, что является очень характерным для эстuarной седиментации и загрязнения. Зона равновесия между речными и морскими водами может занимать разное положение в эстуарии, что имеет важное значение для осаждения осадков и загрязняющих веществ. Взвешенные наносы речных вод обычно изменяют свои электрические свойства и флоккулируют, отлагаясь в эстуарии, когда они входят в контакт с соленой морской водой. Поэтому у галоклина в эстуарии формируется турбидитный максимум, который в нашей литературе обычно называют «максимумом мутности» или «илистой пробкой». Быстрое уменьшение скорости течения в эстуарии выше клина соленых морских вод вызывает интенсивную аккумуляцию наносов и загрязнителей.

Благодаря специфическим гидрологическим процессам с периодическим возникновением застойных условий эстуарии являются эффективными седиментационными ловушками с высокими скоростями накопления (0,4—0,7 мм/год). Осадки поступают в эстуарии из рек в виде влекомых и взвешенных речных наносов, за счет абразионного и эрозионного размыва берегов, из моря вследствие вдольберегового перемещения морских наносов, золовым путем из атмосферы, а также за счет активной биопродуктивности самих эстуариев, являющихся весьма благоприятными местами для обитания животного и растительного мира.

В эстуариях отлагается около 2/3 стока речных наносов. Вследствие коагуляции в них осаждается от 60 до 80% растворенных в пресных водах гуминовых кислот и железа, а с ними осаждаются и многие другие загрязняющие элементы. Интересно отметить, что в составе речных вод больше развиты элементы во взвешенном состоянии, а после барьера на границе с солеными морскими водами резко преобладает растворенная форма [2]. Таким образом, в осадки эстуариев поступает много элементов в реакционно-способной форме, что обеспечивает возможность образования минералов за счет поступающих растворов. Разнообразие веществ в эстуариях очень благоприятно оказывается на широком распространении здесь организмов, которые образуют своеобразный биологический барьер. Растительные и животные сообщества обладают не только фильтрующими и коллекторскими функциями, но и вследствие своей высокой продуктивности способны производить дополнительно большие массы вещества, что значительно увеличивает суммарную скорость осадконакопления.

В эстуариях можно выделить три основные среды осадконакопления: 1) дно русел, где формируются русловые фации; 2) прибрежные и межрусловые участки пойм, заливаемые во время приливов и паводков, на которых отлагаются осадки пойменного облика; 3) мелководные бухты и межустевые участки приливной равнины. Русловые фации эстуариев, образующиеся в достаточно высокой энергетической обстановке, представлены в основном песками с характерной разнонаправленной косой слоистостью, образующейся под воздействием приливных и отливных течений. Осадки пойм представлены слоистыми глинами и алевритами. В бухтах в зависимости от источника поступления осадков и энергии волнения могут накапливаться илы или пески.

Анализ современных процессов осадконакопления в эстуариях позволяет сделать следующие основные выводы об их возможном загрязнении. Наиболее благоприятные условия для накопления загрязняющих веществ имеются в зоне выклинивания галоклина, где часто образуется турбидитный максимум. Здесь у своеобразного геохимического и гидродинамического барьера происходит массовая садка растворенных веществ и интенсивное осаждение взвешенных и влекомых частиц, что несомненно приводит к аккумуляции и концентрации загрязнителей. Защитные условия мелководных бухт и межрусловых участков приливной равнины также достаточно благоприятны для осаждения загрязняющих веществ. Достаточно благоприятны для загрязнения и участки пойм, заливаемые во время

паводков и приливов. Дно русел, особенно при высоких приливах и нагонах, интенсивно промывается, и вследствие этого загрязнения донных осадков практически не происходит или оно очень незначительное.

Берега эстуариев обычно заняты обширными солянами маршами, которые имеют уникальную способность к очистке сточных загрязненных вод. Поэтому эстуарии традиционно используются в качестве приемника вод, содержащих промышленные и коммунальные отходы. Способность эстуариев восстанавливать жизнеспособность является, в частности, функцией скорости разбавления отходов водами, а она определяется морфологией эстуария и особенностями приливного и отливного режимов. Типы загрязнений, которые могут воздействовать на эстуарии и окружающие их марши, различны и включают разнообразные токсины, в частности, тяжелые металлы и органические вещества. Кроме того, в эстуарии привносятся биодеградированные органические материалы, поступление которых сопровождается опасным увеличением биологического потребления кислорода и питательных веществ, которые вызывают эвтрофикацию. Если эстуарии используются как приемник вод первично очищенных стоков, то они могут получать все эти три загрязнителя. Поэтому следует иметь в виду возможные эффекты их кумулятивного воздействия.

Тяжелые металлы из рек и океана движутся через эстуарии естественным путем, но их приток может быть существенно усилен антропогенными источниками. Ионы металлов отчасти адсорбируются глинами, хотя примерно 80% их притока проходит через эстуарии, не сорбируясь глинами. Однако глины являются все же возможным эффективным механизмом спасения от загрязнения алевритовых эстуариев. Часть сорбированных металлов включается в ткани водорослей и мобилизуется животными через детритную пищевую цепь, когда растения отмирают. Поэтому в эстуариях, которые сильно загрязнены, будет продолжаться поступление металлов в пищевую сеть из осадков на протяжении многих лет после прекращения действия источника загрязнения. При концентрации, превышающей в 10 или более раз уровень естественных содержаний, такие металлы будут токсичны для водорослей, что может привести к нарушению устойчивости экосистемы. Большую опасность представляет ртуть, которая способна накапливаться в высоких концентрациях в тканях хищных рыб и млекопитающих. Поэтому она может встречаться в естественных водах как в неорганической, так и в метиловой (наиболее опасной) форме.

Биодеградированные органические материалы, такие как сточные воды и некоторые отходы химических предприятий, представляют прямую и непосредственную угрозу для эстуариев и маршей. В высокопродуктивных маршах большие скорости продукции органического материала уравновешиваются достаточно быстрым окислением его аэробными микроорганизмами в воде и на поверхности осадков [1]. Однако известны случаи, когда в некоторых приливных эстуариях теплыми летними ночами при определенных фазах прилива полностью расходовался весь кислород, что приводило к замору рыбы.

Во многих районах эвтрофикация эстуариев осуществляется из-за антропогенного внесения избытка питательных веществ для растений. Однако наиболее чувствительны к этому виду загрязнения те эстуарии, в которых отсутствуют глинистые осадки, а также эстуарии, бедные питательными веществами для растений.

Для загрязнения эстуариев большое значение имеет поверхность дно — вода, которая является не только физической границей. Через нее осуществляются сложнейшие химические процессы, происходит поступление питательных веществ и удаление метаболитов. Интенсификация процессов обмена, которая усиливается при увеличении поверхности границ, служит средством увеличения биопродуктивности. В тех случаях, когда граница проницаема, т. е. обладает фильтрационными свойствами, площадь поверхности взаимодействия резко возрастает. Интенсивность взаимодействия в значительной мере определяется относительными скоростями движения воды и донного субстрата. Поэтому наряду

с поверхностью важнейшей функциональной составляющей обмена является скорость движения воды или крупность взвешенного материала. Эти движения воды могут быть обусловлены внешними по отношению к обитателям отложениями воздействиями. Однако в большинстве случаев организмы бентоса способны создавать дополнительные токи веществ за счет фильтрующей работы или другими способами.

Эстуарии весьма «благоприятны» для загрязнения нефтепродуктами [15]. Так, в загрязненных эстуариях в донных осадках концентрация нефти может достигать 5—160 мг/кг, тогда как в открытых частях океана она составляет всего 0,1—1,0 мг/кг.

Таким образом, дельты и эстуарии можно районировать по степени возможного загрязнения, которое может существенно меняться в их различных частях, характеризующихся специфическими условиями осадконакопления, тесно связанными с динамикой водной массы. Так, в дельтах, в пределах устьевого участка где резко преобладает транзит наносов, загрязнения практически не происходит, так как почти все загрязнители выносятся вниз по течению. В наземной части дельты распределение загрязняющих веществ по ее поверхности тесно связано со строением гидрографической сети. Более или менее равномерное распространение загрязнителей характерно для дельт с переплетающимися рукавами. В дельтах с ветвящимися руслами максимальные концентрации загрязняющих веществ могут быть связаны с узлами разветвления рукавов, где происходит значительная аккумуляция наносов. По одиночным руслам подавляющая часть загрязнителей выносится на предустьевое взморье. Весьма благоприятной для загрязнения является зона проникновения в рукава приливных или нагонных соленых морских вод, где происходит массовое выпадение взвешенных частиц и формируется фация приливного подпора. На предустьевом взморье границей распространения влекомых наносов в виде аккумулятивных форм является свал глубин, где также отмечается активное смешение пресных речных и соленых морских вод. Поэтому здесь происходит коагуляция и накопление тонких взвешенных наносов, что приводит к обогащению фации свала глинистым материалом, с которым могут выпадать и загрязнители.

В эстуариях наибольшего загрязнения следует ожидать у гидродинамического и геохимического барьера, образующегося в зоне выклинивания галоклина, где происходит активная садка растворенных веществ и интенсивное накопление взвешенных и влекомых частиц наносов.

Следовательно, как в дельтах, так и в эстуариях самой опасной для загрязнения является зона смешения пресных речных и соленых морских вод, где кроме гидродинамического и геохимического формируется также (особенно в эстуариях) и биологический барьер.

Приведенные выше геоэкологические особенности дельт и эстуариев позволяют сделать практические выводы по возможному загрязнению конкретных подобных объектов. Экологическое изучение районирования устьевых областей России является насущной задачей при их использовании в хозяйственных целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемьев В. Е., Лазарева М. Г. Органическое вещество в эстуарии Северной Двины//Литология и полез. ископаемые. 1984. № 5. С. 51—57.
2. Гордеев В. В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
3. Гуков А. Ю. Антропогенное загрязнение в дельте Лены и оценка качества вод//Антропогенное воздействие на природу заповедников. М.: ЦНИЛ охот. хоз-ва и заповедников. 1990. С. 132—136.
4. Израэль Ю. А., Цыбань А. Е. Антропогенная экология океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 527 с.
5. Лапин И. А., Елигарова И. А. Состав и распределение органических соединений в эстуарных участках рек//Гидробиол. журн. 1991. Т. 27. № 5. С. 91—96.
6. Максимова М. П. Антропогенные изменения ионного стока крупных рек Советского Союза//Вод. ресурсы. 1991. № 5. С. 65—69.
7. Михайлов В. Н. Проблемы изучения, использования и охраны устьевых областей рек//Тр. V Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 9. Устья рек. Л., 1990.
8. Михайлов В. Н., Повалишникова Е. С. Устьевая область реки как зона динамического взаимодействия и смешения речных и пресных вод//Вестн. МГУ. Сер. 5. 1992. № 5. С. 29—37.
9. Михайлов В. Н., Рогов М. М., Чистяков А. А. Речные дельты (гидрологоморфологические процессы). Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 280 с.
10. Мусатов А. П., Краснопон Г. Ф., Федосеев Е. А. Экологические основы создания оптимального водного режима в дельте Волги и Северном Каспии//Вод. ресурсы. 1981. № 4. С. 21—37.
11. Рогов М. М., Михайлова М. В. Гидрологоморфологические процессы в устьевых областях рек и их антропогенные изменения//Тр. V Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 9. Л., 1991. С. 88—94.
12. Сафьянов Г. А. Эстуарии. М.: Мысль, 1980. 110 с.
13. Синенко Л. Г., Ахмедов А. А. Изменение гидрологического режима дельты Волги вследствие работы Волжского водохранилища//Тр. V Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 9. Л., 1990. С. 109—115.
14. Тарасов М. Н. Вынос органических, биогенных веществ и пестицидов реками с территории СССР в условиях антропогенного воздействия//Тр. V Всесоюз. гидрол. съезда. Т. 5. Л., 1991. С. 169—178.
15. GESAMP. Land/Sea boundary flux of contaminants: Contributions from rivers//Rep. and Studies. 1987. № 32. Р. 24—31.
16. Meybeck M. Pathways of major elements from land to ocean//River Inputs to Ocean Systems. United Nations. N. Y., 1981. Р. 40—52.
17. Pritchard D. W. What in an estuary: physical viewpoint//Estuaries. Am. Assoc. Adv. Sci. Publ., 1967. № 83. Р. 88—98.

Поступила в редакцию
11.V.1994

МГУ
ВНИИ зарубежгеология

УДК 624.131

© 1995 г. С. Р. КРАЙНОВ, Б. Н. РЫЖЕНКО

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ
МИГРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И МАССОПЕРЕНОСА,
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ**

Проблема миграции подземных вод и массопереноса в гидрогеологических системах включает не только гидроэдинамическую, но и геохимическую часть. Авторы дополняют положения статьи В. А. Мироненко [9] изложением современных геохимических проблем изучения и моделирования миграции подземных вод и массопереноса. Рассмотрены исходные геохимические положения, являющиеся основой методологии моделирования геохимических процессов при миграции подземных вод; пути и современные тенденции моделирования геохимических процессов распределения неконсервативных компонентов в гомогенных и гетерогенных гидрохимических системах; пути реализации синтеза транспортных, термодинамических и кинетических моделей при прогностическом моделировании распределения неконсервативных компонентов в подземных водах. В заключении сформулированы принципы комплексирования транспортных, термодинамических и кинетических моделей в зависимости от геохимических свойств веществ, учитываемых в прогнозных задачах.

Поводом для нашей статьи послужила статья В. А. Мироненко [9], рассматриваемая нами как приглашение всесторонне обсудить состояние проблемы изучения и моделирования миграции подземных вод и массопереноса в гидрогеологических системах и наметить основные стратегические направления развития и совершенствования исследований по этой проблеме.

Необходимость нашей работы определили следующие положения.

1. Изучение миграции подземных вод и массопереноса в гидрогеологических системах — важнейшая проблема современной гидрогеологии. Она имеет много аспектов, но в статье В. А. Мироненко рассмотрена только одна ее сторона, с позиций специалиста по гидроэдинамике, изучающего механический транспорт вещества подземных вод. Между тем эта проблема гораздо более широкая. В статье [9] рассмотрена лишь только часть комплекса тех актуальных реальных проблем, которые действительно существуют в современной гидрогеологии в связи с изучением миграции подземных вод и переноса веществ в них.

2. Миграция подземных вод и массоперенос в гидрогеологических системах включают не только перемещение самой воды или растворов разной минерализации, в соответствии с механическими параметрами фильтрации, но и миграцию содержащихся в них веществ (компонентов), обладающих различными геохимическими свойствами и участвующими в гомогенных и гетерогенных взаимодействиях в соответствии с их химическими потенциалами в данной точке пространства и данный момент времени. Такое понимание миграции и массопереноса согласуется с формулировкой Л. Лукнера и В. М. Шестакова [7], согласно которой под миграцией понимается перемещение и трансформация компонентов подземных вод, приводящие к изменению их содержания. При этом речь идет не только о движении всей массы воды (как это рассматривается в процессах фильтрации), но и о взаимном перемещении отдельных компонентов подземных вод, определяющих их состав и свойства. Эти авторы совершенно правильно

полагают, что количественные исследования миграции подземных вод должны опираться на построение моделей гидрохимических процессов, состоящих из моделей процессов переноса и физико-химической трансформации мигрирующих веществ [7].

В свете этих положений, качество подземных вод как важнейший объект геоэкологии определяется не только (а для многих веществ — и не столько) гидродинамическим транспортом веществ подземных вод, но и теми гомогенными и гетерогенными геохимическими взаимодействиями, которые эти вещества претерпевают при этом. Соответственно миграционные и массопереносные модели должны учитывать не только перемещение самих водных масс, но и перенос содержащихся в них веществ со всеми их геохимическими трансформациями. Иначе прогнозные модели не будут адекватны природной реальности. К сожалению, такие неадекватные модели, изощренно учитывающие нюансы гидродинамики, но не учитывающие элементарные геохимические процессы или рассматривающие их в аспекте, не соответствующем их физико-химической сущности, широко используются в современной гидрогеологии для прогноза качества подземных вод, и это для многих неконсервативных (активных в геохимическом отношении компонентов) ведет к недостоверным прогнозам. В статье [9] с ее многообещающим названием эти проблемы должны были быть по меньшей мере хотя бы затронуты. Для правильного понимания, изучения и моделирования процессов массопереноса в гидрогеологических системах авторы данной статьи пришли к выводу о необходимости представить проблему изучения и моделирования геохимических процессов при массопереносе в расширенном виде, т. е. рассмотреть исходные геохимические положения, оптимальные пути моделирования, методы их реализации, информационное и программное обеспечение. Это необходимо как для понимания степени сложности тех новых вопросов, которые в последнее время возникли перед специалистами по массопереносу, так и для освещения задач, которые необходимо решить в ближайшие годы. Таким образом, наша цель не полемизировать со взглядами В. А. Мироненко, а дополнить их современными геохимическими проблемами и задачами изучения и моделирования массопереноса, составляющими важную часть гидрогеологической экологии.

Исходные положения

1. Все нормируемые компоненты подземных вод, по которым осуществляются прогнозные геоэкологические решения, по своим способностям и возможностям участвовать в геохимических реакциях разделяются на две основные группы: консервативные и неконсервативные.

Консервативные компоненты не участвуют в геохимических реакциях, или их реакциями в гидрохимических системах при решении конкретных инженерных задач можно пренебречь. С геохимических позиций — это компоненты, результаты геохимических взаимодействий которых не оказывают практического влияния на баланс масс в гидрохимической системе в результате конвективно-диффузационного переноса. К ним относятся химические элементы (компоненты), образующие вещества с очень высокой растворимостью их соединений в подземных водах (Cl^- , Br^- , NO_3^- и др.), не достигающие насыщения по ним в реальных условиях формирования подземных вод, а также загрязняющие органические вещества с периодом деструкций и трансформаций несоизмеримо большим, чем время формирования самих загрязненных вод.

Неконсервативные компоненты в той или иной степени участвуют в геохимических процессах в гомогенных и гетерогенных гидрохимических системах. Результаты таких геохимических взаимодействий сопоставимы с изменением их баланса масс, происходящим при конвективно-диффузационном переносе. В геохимическом отношении эти компоненты: а) имеют относительно малую растворимость своих соединений, способны к образованию твердой фазы в конкретной гидрохимической системе; б) участвуют в реакциях комплексообразо-

вания; в) претерпевают окисление — восстановление за счет других компонентов системы вода — порода (органические вещества, сульфидная сера и др.); г) участвуют в сорбционных и ионнообменных процессах. Неконсервативные компоненты резко преобладают в подземных водах, их доля составляет 95% от общего числа присутствующих в них веществ. Поэтому неучет их геохимических взаимодействий в геоэкологических решениях исключает возможность построения моделей, адекватных природной реальности, и это соответственно ведет к недостоверным прогнозным геоэкологическим решениям.

II. Реальное многообразие природных условий можно представить в виде комбинаций трех типовых базовых ситуаций, которые служат основой для выбора оптимальных методов моделирования и прогнозирования изменений химического состава подземных вод:

1. Распределение загрязняющих компонентов контролируется только гидро-геодинамикой среды. Это происходит только с консервативными компонентами. Для прогноза их распределений целесообразно использовать обычные транспортные (массопереносные) модели и созданные на их основе компьютерные программы. Использовать геохимические модели и геохимические компьютерные программы в таких ситуациях нет необходимости.

2. Распределение химических компонентов контролируется только геохимическими реакциями. Такие ситуации довольно обычны, когда приходится иметь дело с неконсервативными компонентами подземных вод, имеющими малую растворимость своих соединений и осаждающимися даже при небольших вариациях состава геохимической среды (Fe^{3+} , Al^{3+} , многие другие элементы-гидролизаты). Лимитирующее значение геохимических реакций несомненно велико с влиянием транспортных процессов, и поэтому транспортные модели при прогностическом моделировании качества подземных вод неприменимы — должны быть использованы обычные термодинамические программы, основанные на равновесных моделях геохимических процессов.

3. Распределение химических веществ контролируется совместным действием гидродинамики и геохимии среды. Такие ситуации возникают когда приходится иметь дело: а) с неконсервативными компонентами, обладающими относительно высокой растворимостью их соединений с компонентами подземных вод и загрязняющими вещества; б) с неконсервативными компонентами, проявляющими устойчивость к окислительно-восстановительному воздействию со стороны других компонентов подземных вод (например, органические вещества медленно окисляемые растворенным кислородом). Чем более растворимо соединение, образуемое химическим компонентом (или чем медленнее оно окисляется), тем дальше оно от состояния равновесия и тем больше этот компонент проявляет в подземных водах свойства консервативности и, следовательно, тем большее значение в формировании его концентраций в гидрохимических системах имеют транспортные составляющие массопереноса.

В реальных гидрохимических системах такие ситуации являются наиболее частыми, и при прогнозных решениях всегда существует проблема — как совместить в моделях и программных средствах явления массопереноса с геохимическими реакциями. Анализ существующих в настоящее время программных средств показал, что большая часть используемых в них моделей отражает «очищенные» от других процессов стандартные ситуации (например, рассматриваются только геофiltрационные или массопереносные процессы без геохимических реакций или рассматриваются только чисто геохимические реакции без учета массопереноса и т. д.). Между тем для реальных гидрохимических условий более характерны не «чисто» стандартные, а промежуточные комплексные ситуации, при которых геохимические реакции происходят на фоне движения подземных вод, т. е. геофiltрация и массоперенос сопровождаются геохимическими процессами. Соответственно и качество подземных вод обычно является результатом определенных количественных соотношений между этими процессами.

В связи с этим возникает серия вопросов: как обеспечить адекватность существующих моделей и компьютерных программ реальным природным и техногенным процессам; какие природные ситуации позволяют использовать ту или иную компьютерную программу и какие критерии могут обеспечить адекватность прогнозной модели природной реальности; исчерпывают ли существующие программные средства возможный набор реальных природных ситуаций.

Это важнейшие вопросы современного моделирования процессов, происходящих в гидрохимических системах. Методологически с позиций использования различных моделей и компьютерных программ целесообразно разделить гидрохимические системы на гомогенные и гетерогенные. Разумеется, такое разделение достаточно условно, поскольку подземные воды всегда формируются в горных породах и как минимум две фазы для них обеспечены. Но тем не менее это разделение становится возможным, если понимать под гомогенными такие системы, реакции взаимодействия с породами в которых имеют несомненно меньшую скорость и соответственно несомненно меньшую геохимическую значимость сравнительно с реакциями в самой водной фазе.

Пути и современные тенденции моделирования геохимических процессов распределения неконсервативных компонентов в гомогенных гидрохимических системах

В гомогенных гидрохимических системах протекают химические процессы трех основных типов, определяющих формы существования химических элементов в природных водах: гидролиз компонентов при взаимодействиях с H^+ и OH^- , комплексообразование (ассоциация-диссоциация растворенных в водной фазе частиц) и окисление—восстановление (обмен электронами между растворенными частицами переменновалентных элементов). Эти процессы приводят к различным эффектам, изменяющим качество подземных вод. Например, гидролиз бериллия в щелочных водах приводит к выведению его из раствора ($\text{Be}^{2+} + 2\text{OH}^- = \text{Be}(\text{OH})_2$; $\text{P}_{\text{Be}(\text{OH})_2} = 2 \cdot 10^{-26}$), и качество подземных вод улучшается.

Наоборот, комплексообразование $\text{Fe}^{3+} + \text{FK}^{2-} = \text{Fe}(\text{FK})^+$ предохраняет Fe^{3+} от гидролиза и способствует его сохранению в оклонейтральных кислородсодержащих водах, поэтому качество подземных вод ухудшается.

Методы моделирования процессов формирования химического состава подземных вод в реальных гидрохимических системах обычно определяются кинетикой приближения таких систем к состоянию химического равновесия. Основной критерий выбора методов моделирования — соизмеримость времени релаксации конкретной гидрохимической системы к химически равновесному состоянию с временем формирования и движения подземных вод в данной гидрохимической структуре. Если время релаксации меньше или соизмеримо со временем формирования подземных вод, то оптимальными могут быть классические методы равновесной химической термодинамики и модели, основанные на таких методах, являются адекватными гидрохимической реальности. Если же время релаксации соизмеримо больше времени формирования подземных вод, то модели равновесной химической термодинамики не будут полностью адекватны гидрохимической реальности — с помощью таких методов возможно определить только предельное состояние гидрохимической системы, но нельзя с необходимой точностью рассчитать реальные концентрации веществ и продуктов их трансформаций на каждый момент времени в каждой точке пространства. В таких случаях необходимы методы и модели, основанные на изучении кинетики химических реакций. Если же время релаксации системы к равновесному состоянию несомненно больше, чем время формирования подземных вод, то компоненты во многом ведут себя как консервативные и адекватными реальности могут быть только модели, учитывающие транспорт вещества. Эти положения являются особенно важными при выборе методов моделирования качества загряз-

ненных подземных вод, поскольку время формирования таких вод обычно очень невелико.

Экспериментально установлено, что большинство гомогенных (гидролиз, комплексообразование и др.) реакций неорганических веществ в водной фазе имеет время протекания порядка секунд. Например, растворенные формы углекислоты (карбонатные системы) релаксируют к равновесным состояниям практически мгновенно. Так как скорость процессов ассоциации-диссоциации чрезвычайно высока, то в гомогенной водной фазе компоненты находятся в практически равновесном состоянии и будут или исходно закомплексованы, или же перезакомплексованы при смешении подземных вод с загрязняющими стоками. В форме комплексных соединений компоненты «устойчивы» к окислению-восстановлению, осаждению, адсорбции и ионному обмену.

Гомогенные окислительно-восстановительные реакции, происходящие с участием переменновалентных элементов (например, окисление железа (II) или сульфидной серы кислородом воздуха), имеют время протекания порядка нескольких минут — часов. Этой скорости вполне достаточно, чтобы считать гидрохимические системы равновесными для прогноза качества подземных вод и корректно применять к ним методы равновесной химической термодинамики. При этом обычное термодинамическое моделирование дает не только предельные концентрации химических компонентов в складывающихся или задаваемых ЕнрН ситуациях, но и количественные соотношения между миграционными формами этих элементов, что важно для оценки способности подземных вод к самоочищению и для разработки технологических приемов получения оптимального химического состава питьевых подземных вод.

В зависимости от решаемых задач и реальных гидрохимических условий при прогнозах качества подземных вод в гомогенных системах, содержащих неорганические компоненты, могут быть использованы многие термодинамические программы, но наиболее оптимальными и удобными для решения прикладных задач все же являются программы, основанные на константах равновесия химических реакций [8]. Причина в том, что решение конкретных прикладных экологических задач качества подземных вод всегда требует определенной специализации компьютерной программы применительно ко всем особенностям и сложностям реальных гидрохимических ситуаций. И в этом отношении программы «на константах» обладают большей подвижностью и способностью к взаимозаменяемости отдельных их блоков в зависимости от вероятных миграционных форм химических элементов и условий их геохимических трансформаций. Кроме того, они математически менее сложны по сравнению с программами, основанными на методе минимизации. Оптимальными для наших задач являются отечественные программы серии MIF [8], а среди американских программ — серии WATEQ, MINTEQ и GEOCHEM для менее минерализованных вод и PHRQPITZ, SNORM для более минерализованных [3]. Имеется достаточно много примеров хорошей сходимости результатов термодинамического моделирования гидрохимических явлений в гомогенных системах с реальными распределениями химических элементов [8].

Термодинамическое моделирование процессов в гомогенных системах относительно хорошо обеспечено термодинамическими константами индивидуальных неорганических веществ и реакций. Известны также термодинамические параметры простых органических веществ (карбоновые кислоты, аминокислоты и пр.), а также константы устойчивости комплексных соединений, образуемых многими химическими элементами с анионами этих кислот. И это позволяет учитывать при термодинамическом моделировании реакции химических элементов с простыми органическими веществами (примером являются последние программы серии MIF), в которых учтено до 40 органических веществ [5].

Гораздо более трудно моделировать качество подземных вод в гомогенных системах при трансформациях более сложных органических веществ, особенно производных нефтяных углеводородов, время геохимических трансформаций ко-

торых соизмеримо со временем формирования самих загрязненных подземных вод (или больше его). Наиболее часто и в более высоких концентрациях в подземных водах обнаруживают производные такие углеводороды, которые требуют жестких (в отношении концентраций окислителя) условий окисления. Для полного окисления таких веществ необходимы или очень сильные окислители (типа хлорной кислоты), или очень активные биохимические процессы при высоких концентрациях реакционноспособного кислорода. Так для окисления 1 мг предельного нефтяного углеводорода необходимы 3—4 мг O_2 между тем как максимальные количества кислорода, обнаруживаемые в подземных водах верхних горизонтов, редко превышают 10 мг/л. В связи с этим в загрязненных подземных водах мы чаще имеем дело только с начальными стадиями трансформаций нефтяных углеводородов. Обычно это метастабильные, далекие от равновесий, состояния, являющиеся результатом начальных стадий окисления, интенсивность которого зависит от концентраций кислорода в подземных водах, характера микробиологических популяций, гидродинамической интенсивности водообмена, скорости фильтрации и др. Время полного окисления органических веществ и соответственно время приведения их в химически равновесное состояние со средой чаще оказывается значительно больше времени формирования самих загрязненных вод, оно может составлять сотни лет [11]. Поэтому в загрязненных подземных водах техногенные органические вещества переносятся в виде промежуточных по ходу трансформаций соединений, метастабильных по отношению к общей гидрохимической ситуации. Методы равновесной химической термодинамики здесь практически оказываются непригодными и основой геохимического моделирования качества подземных вод в этих ситуациях является сочетание гидродинамических и кинетических методов, учитывающих транспорт и трансформацию веществ в различных природных ситуациях. Получение кинетических параметров таких трансформаций затрудняется тем, что скорость деструкции органических веществ снижается при уменьшении степени аэробности среды (в анаэробных ситуациях скорость деструкции органических веществ на несколько порядков ниже), а также тем, что общая интенсивность и скорость окислительного разложения углеводородов зависят от их молекулярного веса и количества содержащихся в них атомов углерода (чем большими являются эти параметры органического вещества, тем труднее оно окисляется и тем больше кислорода потребуется на его окисление).

Строго говоря, кинетических констант трансформации и деструкции углеводородных органических веществ не может быть, поскольку их скорость зависит от многих факторов. Поэтому основной путь получения кинетических параметров — экспериментальный применительно к данной конкретной гидрогеологической и геохимической ситуации. Должны быть найдены параметры, характеризующие скорость преобразований органических веществ в зависимости от геохимических свойств, степени аэробности (или анаэробности) среды, скорости фильтрации подземных вод, количества микробиологических популяций и т. д. В этом большая сложность и трудоемкость моделирования геохимических процессов и миграции углеводородных органических веществ в подземных водах. Подготовка информационной базы для такого моделирования — дело гораздо более трудоемкое, чем сам процесс составления и расчетной реализации моделей. Обычно для получения информационной базы должны использоваться достаточно крупные экспериментальные установки (называемые в США MICROCOSM), имитирующие природные гидрогеологические и гидрохимические ситуации решаемой задачи. Будучи физически реализуемыми моделями природной ситуации, они служат основой для последующего вычислительного компьютерного моделирования и являются его параметрической основой [4].

Существуют различные способы использования экспериментов, начиная от получения эффективных эмпирических зависимостей, характеризующих изменения видового состава органических веществ в направлении движения подземных вод, и кончая составлением уравнений массопереноса, в которые вносятся

кинетические параметры преобразований веществ в данных природных ситуациях. Опыт моделирования трансформаций органических веществ с прогнозными задачами показывает, что оптимальный комплекс параметров, необходимых для такого моделирования, должен включать [11]:

исходные концентрации углеводородов, кислорода, количество микроорганизмов в единице объема;

кинетические параметры, характеризующие скорость микробиологической деструкции органических веществ в данной гидрогеологической ситуации;

коэффициенты потребления кислорода;

параметры, характеризующие влияние скорости фильтрации подземных вод на скорость деструкции органических веществ;

параметры, характеризующие удаление продуктов реакции в результате диффузионных процессов;

параметры дисперсии веществ.

Моделирование трансформаций органических веществ принадлежит к наиболее сложным видам прогнозного моделирования еще и в связи с отсутствием детерминированности геохимических явлений и высокой степенью их неопределенности в зависимости от конкретных гидрогеологической, геохимической и микробиологической ситуаций. Такое моделирование всегда требует мощного полевого и экспериментального обеспечения, ликвидирующего эту неопределенность.

Пути и современные тенденции моделирования геохимических процессов распределения неконсервативных компонентов в гетерогенных гидрогеохимических системах

В гетерогенных гидрогеохимических системах к уже рассмотренным процессам гидролиза, комплексообразования и окисления-восстановления в водной фазе добавляются гетерогенные процессы: растворение-осаждение твердых фаз; растворение газов — дегазация; адсорбция компонентов, растворенных в водной или газовой фазах, на твердом веществе; ионный обмен компонентов между водной и твердой фазами; соосаждение компонентов водной фазы при образовании осадка твердой фазы.

В результате геохимических процессов в гетерогенных системах может происходить как ухудшение качества подземных вод, так и его улучшение. Примеры: увеличение концентраций Al, Fe, Zn, Pb, Cu, Cd в грунтовых водах при взаимодействии «кислых дождей» с почвами и породами; образование очень токсичной монометилртути в результате реакции $Hg^{2+} + CH_3^- = CH_3(Hg)^+$ при поступлении стоков, содержащих органические вещества, в породы, с повышенными концентрациями ртути, вследствие этого экологическое состояние подземных вод резко ухудшается; осаждение NH_4^+ мелкодисперсной фазой пород при трансформациях $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NH_4^+$, происходящих при взаимодействиях «нитратных сточных вод» с неокисленными органическими веществами пород и стоков.

Особо важное влияние на перенос неконсервативных компонентов имеет процесс комплексообразования, усиливающий способность элементов-комплексообразователей к миграции и накоплению в водной фазе. Комплексообразование также способствует переводу дополнительных масс таких элементов из твердой фазы, и из-за этого качество подземных вод еще более ухудшается.

Расчетный аппарат равновесной химической термодинамики позволяет давать корректное количественное описание гетерогенных гидрогеохимических систем, если они приближаются к состоянию химического равновесия. Более доступно применение методов равновесной химической термодинамики к гетерогенным системам, характеризующимся конгруэнтным растворением труднорастворимых соединений твердой фазы (гидроокислы, силикаты и др.). Такое растворе-

ние оказывается достаточно быстрым — обычно несколько суток достаточно для насыщения контактирующего с твердой фазой раствора компонентами любой конгруэнтно растворяющейся твердой фазы горной породы [10], поэтому термодинамические модели обычно являются адекватными той реальности, которая возникает во многих (но не всех) гидрогеохимических системах с конгруэнтным растворением твердой фазы.

Скорость конгруэнтного растворения твердых веществ пропорциональна площади S контакта водная/твердая фаза, величинам коэффициентов диффузии D^0 и закомплексованности β компонентов в водном растворе, произведению растворимости ПР твердой фазы. В частной форме выражение для скорости конгруэнтного растворения имеет вид

$$\lg V(\text{моль}/\text{см}^2 \cdot \text{с}) = \frac{1}{n} (\lg D + \lg \text{ПР} + \sum_i \lg \beta_i); D = D^0 S / 1000 d,$$

где n — число компонентов твердой фазы, d — параметр линейной диффузии, ПР — произведение растворимости твердой фазы, β_i — коэффициент закомплексованности i -компонента твердой фазы, равный отношению суммарной концентрации всех форм к активности формы, избранной в качестве независимого компонента (например, $CaCO_3$; независимые компоненты Ca^{2+} , CO_3^{2-}). Поскольку β возрастает, то скорость растворения твердой фазы увеличивается с возрастанием минерализации водной фазы. Несмотря на то, что плохо растворимые (низкие ПР) твердые вещества имеют меньшую скорость растворения, насыщение водной фазы плохо растворимыми твердыми веществами происходит при достижении меньших концентраций, т. е. легче реализуемо ввиду изначального присутствия в природных водах всех химических элементов (закон Вернадского).

Поскольку скорость растворения, согласно приведенному уравнению, является также функцией диффузии d , должна существовать зависимость между скоростью фильтрации и степенью насыщенности фильтрующейся раствором. Действительно, такая зависимость проявляется в подземных водах: например, степень приближения подземных вод к насыщению по CaF_2 растет с уменьшением скорости их движения [8]. И наоборот, многие системы удаляются от состояния равновесия при увеличении скорости фильтрации подземных вод [5]. Это означает, что при определенных скоростях фильтрации подземных вод (разных для различных гидрогеохимических систем) при моделировании миграционных процессов в системах с конгруэнтным растворением должен осуществляться синтез массопереносных и термодинамических моделей. Для количественного описания здесь часто не требуются методы и модели кинетики, поскольку соотношение между скоростями реакций и скоростями движения подземных вод таково, что гидрогеохимические системы достаточно быстро становятся равновесными. При этом решающее влияние на степень приближения систем к равновесным состояниям приобретают уже геохимические свойства самих подземных вод — такие, как pH, концентрации отдельных компонентов, входящих в состав твердой фазы.

Более сложным является прогностическое моделирование распределений неконсервативных элементов при инконгруэнтном растворении содержащих их минералов и пород.

Принципиально возможны два варианта инконгруэнтного растворения твердого вещества: 1) при накоплении в растворе компонентов конгруэнтно растворяющейся твердой фазы достигается их насыщение относительно новых твердых фаз (например, калиевый полевой шпат конгруэнтно растворяется вплоть до насыщения водной фазы относительно гидроокислов алюминия, которые осаждаются; затем имеет место процесс растворения исходной фазы в присутствии выпавшей в осадок фазы); 2) возможно также селективное избыточное «вымывание» части компонентов твердой фазы. В этом случае процесс растворения замедляется образованием на поверхности растворения вторичной твердой фазы, что приводит к замедлению наступления состояния химического равновесия в

системе первичный минерал — подземная вода или вообще к его недостижению. Экспериментально установлено, что часто растворение в таких гетерогенных инконгруэнтных системах лимитируется диффузией вещества через слой образующихся вторичных продуктов.

При моделировании качества подземных вод в таких системах необходимо экспериментальное определение кинетических параметров, характеризующих скорость растворения. Соответственно при кинетических расчетах учитывается удельный поток вещества с единицы площади поверхности твердой фазы $Q = W(C_n - C_0)$, где коэффициент скорости растворения W может иметь различный физический смысл в зависимости от кинетического механизма растворения. Если процесс лимитируется внешнедиффузионным механизмом, то коэффициент скорости тождествен коэффициенту массоотдачи с его закономерными изменениями в зависимости от скорости движения подземных вод. Если же процесс растворения лимитируется внутридиффузионным кинетическим механизмом, то коэффициент скорости растворения тождествен коэффициенту массопередачи, зависящему от соотношений между поверхностями твердой и водной фаз. В указанном уравнении используют значения C_n — равновесной концентрации веществ в подземной воде. А это означает, что кинетическим расчетам должно предшествовать термодинамическое моделирование данной гидрохимической системы, с помощью которой определяют равновесное состояние прогнозируемых компонентов данной системы.

Пути реализации синтеза транспортных, термодинамических и кинетических моделей при прогностическом моделировании распределения неконсервативных компонентов в подземных водах

Исследователи, решавшие эту проблему, длительное время работали в двух направлениях.

1. Моделирование необратимой эволюции гидрохимических систем в рамках методов равновесной химической термодинамики (метод степени протекания реакции или ξ -метод). Этот метод был предложен в 1969 г. Г. Хельгесоном и затем был развит в работах И. К. Карпова [2]. Его дальнейшим развитием является «метод проточных реакторов», являющийся переходным к равновесно-динамическим моделям. В работе [6] эта задача решается на основе совокупности последовательных гетерогенных резервуаров с локально-временным равновесием, соединенных между собой потоками подвижных фаз.

2. Внесение параметров химических реакций в уравнения массопереноса. Этот метод наиболее сложен и пока труднореализуем для реальных гидрохимических систем вследствие возникновения нелинейности системы уравнений и экспоненциального возрастания машинного времени расчета с ростом числа учитываемых в уравнениях химических компонентов. Поэтому такой путь обычно реализуется только для случаев, когда имеется малое число (< 3) взаимодействующих веществ. Например, он пригоден для моделирования процессов массопереноса, учитывающего явления сорбции и ионного обмена нескольких элементов. Если в химических взаимодействиях участвуют десятки и сотни веществ — продуктов комплексообразования, окисления-восстановления и т. д., такой путь синтеза химических процессов с явлениями массопереноса не реален.

Сейчас имеется несколько программ, в которых массоперенос рассматривается совместно с геохимическими процессами, например, программы PHREEQE MST. Их возможности и ограничения рассмотрены в нашей предыдущей работе [3]. В основе химических реакций, учитываемых в программах, лежат равновесные модели. Это определяет тот факт, что большие скорости фильтрации подземных вод делают несостоятельным используемое предположение о локальном равновесии. Соответственно это означает, что возможности таких синтетических прог-

рамм лимитируются обычными положениями равновесной химической термодинамики.

В ряде компьютерных программ для расчета массопереноса, сопровождаемого химическими реакциями, химические процессы рассматриваются независимо от уравнений массопереноса. Примером является программа TRANQL [12], а также наши разработки. В таких программах выполняется последовательный расчет дискретных (во времени или пространстве) распределений химических элементов и анионов, являющихся для них лигандами (Cl^- , Bg^- и др.). На первом этапе расчета решают уравнения массопереноса консервативных компонентов для заданных временными или пространственными координатами точек, а затем в ходе второго этапа для тех же точек на основе рассчитанных распределений лигандов выполняется расчет равновесных концентраций химических элементов-комплексообразователей. И так последовательно рассчитывается вся система на каждом временном или пространственном шаге взаимодействий. При этом учитываются и сорбционные процессы, если имеются константы сорбционного или ионнообменного равновесия для данных геохимических ситуаций. При таком способе синтеза получается вполне удовлетворительное соответствие расчетных и реальных распределений химических компонентов в массопереносных системах [12].

Анализ существующих программных средств, синтезирующих явления массопереноса с геохимическими реакциями и их кинетикой, а также наш опыт моделирования гидрохимических явлений показывают, что направление дальнего моделирования транспорта веществ, геохимических реакций и их кинетики в каждой последовательной дискретной точке гидрохимической системы является наиболее оптимальным.

Заключение

В зависимости от геохимических свойств прогнозируемых компонентов, гомогенности, гетерогенности системы, скорости движения подземных вод выполняется различная последовательность ввода в действие расчетных прогнозных моделей:

для консервативных компонентов используются только транспортные модели;

для неконсервативных компонентов в гомогенных системах, образующих в данных реальных условиях труднорастворимые соединения или быстро (время трансформаций соизмеримо с временем формирования состава подземных вод) трансформирующие соединения, целесообразно ограничиться только термодинамическими геохимическими моделями;

для неконсервативных компонентов, время трансформаций которых в гомогенных системах больше времени формирования самих загрязненных вод, оптимальным является сочетание транспортных (массопереносных) и кинетических моделей;

для хорошо растворимых неконсервативных компонентов с конгруэнтным характером растворения, не образующих новых твердых фаз, необходим синтез термодинамических и массопереносных моделей;

для неконсервативных компонентов с инконгруэнтным растворением их соединений необходимо использовать комплекс массопереносных, термодинамических и кинетических моделей.

Для расчетной реализации таких моделей должен быть основательно пополнен круг термодинамических и кинетических параметров геохимических процессов. Это особенно относится к кинетическим параметрам. Кинетика природных процессов стала объектом исследований только в последние годы, поэтому существует острый недостаток кинетических параметров процессов, определяющих геохимический облик подземных (особенно загрязненных) вод. Но первые сводки таких кинетических параметров уже имеются [1]. Сейчас важно установить количественные взаимосвязи между параметрами протекания геохимических

процессов и гидрогеодинамическими показателями среди гидрогеологических систем. В этом отношении В. А. Мироненко совершенно прав — существует важная проблема информационного обеспечения моделей. Эта проблема станет еще более важной и сложной, когда начнется практическая реализация синтеза транспортных, термодинамических и кинетических моделей. Для ее решения необходимо выполнить обширный комплекс экспериментальных, полигонных и компьютерных вычислительных исследований поведения неконсервативных веществ применительно к конкретным гидрогеологическим и геохимическим ситуациям, как это делается в США [4]. Вполне понимая и поддерживая мнение В. А. Мироненко о высокой степени неопределенности результатов решения обратных задач, мы все же полагаем, что лучше иметь хотя бы приближенные значения параметров (получаемых с помощью обратных задач), чем не иметь их вовсе. Мы видим подтверждение этому доводу в нашем опыте установления эффективных термодинамических параметров различных комплексных соединений в подземных водах именно с помощью решения обратных задач.

В заключение мы хотели бы подчеркнуть, что механическое (гидродинамическое) рассмотрение миграции вещества подземных вод без учета его геохимических свойств — только первая ступень познания массопереноса в подземной гидросфере. За ней должно последовать изучение массопереноса веществ на основе синтеза транспортных и геохимических моделей их миграции. В этом одна из важнейших научных проблем гидрогеологии, и современные тенденции теории и практики геоэкологии требуют ее скорейшей реализации. Именно это положение побудило нас к написанию данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский Е. В., Дорофеев Е. Н. Основные кинетические константы гидрохимических процессов. Киев: Изд. ИГН УССР, 1988. 55 с.
2. Карпов И. К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск: Наука, 1981. 247 с.
3. Крайнов С. Р. Обзор термодинамических компьютерных программ, используемых в США при геохимическом изучении подземных вод. Система компьютеризации научных лабораторий США//Геохимия. 1993. № 5. С. 685—695.
4. Крайнов С. Р. Геохимико-экологические исследования подземных вод в США//Геохимия. 1994. № 7. С. 1052—1075.
5. Крайнов С. Р., Соломин Г. А., Богомолова А. А. Методические рекомендации по термодинамическому моделированию качества подземных вод. М.: ВСЕГИНГЕО, 1993. 121 с.
6. Кулик Д. А., Чудненко К. В., Карпов И. К. Алгоритм физико-химического моделирования эволюции системы локально-равновесных резервуаров, связанных потоками подвижных групп фаз//Геохимия. 1992. № 6. С. 858—870.
7. Лукнер Л., Шестаков В. М. Моделирование миграции подземных вод. М.: Недра, 1986. 208 с.
8. Методы геохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии/Под ред. С. Р. Крайнова. М.: Недра, 1988. 254 с.
9. Мироненко В. А. О некоторых спорных тенденциях в исследованиях миграции подземных вод//Геоэкология. 1993. № 5. С. 3—12.
10. Рыженко Б. Н. Скорость конгруэнтного растворения минералов//Геохимия. 1991. № 11. С. 1653—1656.
11. Borden R., Bedient P. Transport of dissolved Hydrocarbons, influenced by oxygen-limited biodegradation//Water Res. Res. 1986. V. 22. № 13. P. 1973—1982.
12. Cederberg G. A. A TRANQL — a ground Water mass transport and equilibrium chemistry model for Multicomponents Systems. Diss PhD. Stanford. Univ., 1985. 115 p.

ВСЕГИНГЕО
ГЕОХИ РАН

Поступила в редакцию
15.II.1994

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

3 · 1995

УДК 624.131

© 1995 г. Л. В. БАХИРЕВА, В. Г. ЗАИКАНОВ, Л. П. КАЧЕСОВА,
Т. Б. МИНАКОВА, Н. Н. МОСКАЛЕНКО, Н. С. ПРОСУНЦОВА,
Е. Б. СМИРНОВА, Г. М. ЧЕРНЫШОВА

ОПЫТ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ОЦЕНОК УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Разработанная ранее методика геоэкологической оценки территории реализована на модельном участке, характеризующемся достаточной степенью урбанизации, разнообразием природных условий и конфликтными геоэкологическими ситуациями. Выполнена комплексная оценка геоэкологической обстановки и нестабильности территории. Геоэкологическая оценка проводилась в системе взвешенных через стоимостные показатели баллов. В результате были определены истинные границы урбанизированной территории, исследуемая площадь была дифференцирована по оценкам геоэкологического состояния.

Для урбанизированных территорий характерна высокая концентрация населения, промышленных предприятий, объектов инфраструктуры, взаимодействующих на ограниченных площадях. При этом происходит трансформация природных компонентов не только в городах, но и на прилегающих территориях и снижается геоэкологическая стабильность последних. В большинстве существующих и формирующихся агломераций отмечены отклонения от нормативных требований к качеству природной среды. Это определяет актуальность геоэкологических исследований и необходимость рассмотрения урбанизированной территории как природной подсистемы, измененной во многих случаях до критического состояния.

Уровень проводимых геоэкологических оценок урбанизированных территорий и выбранный ранг исследования (ландшафт) соответствуют методике ландшафтного картографирования масштаба 1:100 000 — 1:200 000 [2]. Такой масштаб, наиболее показателен для административных районов средней полосы России, один из которых был выбран в качестве модельной территории. Она из-за своего географического положения характеризуется достаточной степенью урбанизации и разнообразием природных условий. Последние определяются приуроченностью к двум различным физико-географическим провинциям. Первая представлена сочетанием моренных озерно-ледниковых и водноледниковых равнин с преобладанием суглинистых и моренных отложений, вторая — моренных и водноледниковых равнин с преобладанием песчаных отложений. Рассматриваемая территория характеризуется разной степенью освоенности. При среднем значении 158 чел./км² плотность населения изменяется по территории от 1 до 998 чел./км². При этом на долю городского населения приходится 84%. Промышленные объекты сконцентрированы в районе. Сельские населенные пункты тяготеют к водным артериям. Город является основным источником воздействия на окружающую среду, распространяющегося почти до границ района. На территории отмечаются почти все виды воздействий, присущие урбанизированным территориям: деградационное (нарушение земной поверхности), интоксикационное (химическое загрязнение природных компонентов), физическое (формирование техногенных температурных, динамических,

Таблица 1

Характеристика ландшафтов модельной территории

Порядковый номер, физико-географического района	Вид ландшафта	Порядковый номер ландшафта	Состав отложений	Рельеф	Почвы	Леса	Другие угодья	Ведущие экзогенные процессы
I	Озерно-водноледниковые равнины	1 2 3	СГ, П, М СГ, П	СВ ПУ В-У	П, Л ^c П, Л ^c П, Л ^c	МЛ Б Д, МЛ	П П П	Э Э, 3 К, Э, 3
II	Аллювиально-водноледниковые равнины Моренно-водноледниковые равнины Водноледниковые равнины	4 5 6 7	СГ, СП, П П, ГСГ, М П, СГ, М П, СГ	ПЗ В В, Х ПСВ	Д, П П ₂ П ₂ П ₂ , Т, Б	С, МЛП С, Б-С С, Д, Е С-Б-К, Е-С	П П П П, Б	К, Э, 3 Э, 3 Э, 3 З, П
III	Древнеаллювиальные равнины	8	П, СГ	СВ	П ₂ , Т, Б	С, Б	Л	Э, К
IV	Аллювиальные равнины Водноледниковые равнины Аллювиально-водноледниковые равнины Аллювиальные равнины	9 10 11 12 13	П, СП, СГ П, СГ П, СГ П, СП, СГ П, СП, СГ	ПСВ СВ ПСВ ПСВ, З СВ, БП	Д, П П ₂ П ₂ Д, П Д, П, Л ^c	С ₁ , Б С С, Д, Б С, МЛ МЛ, С	Л БП ЗЛ П, Л Л, П	З, Э, К З, П З, П, К К, Э, 3 Э, 3, П

Примечание. Состав отложений: СГ — суглинки, СП — супеси, П — пески, М — морены, ГСГ — гравийные суглинки. Рельеф: СВ — слабоволнистый, ПУ — пологотуаллистый, ПЗ — плоский закарстованный, В — волнистый, Х — холмистый, ПСВ — плоский слабоволнистый, З — закарстованный. Почвы: П — дерново-подзолистые, ЛС — светло-серые лесные, Д — дерновые, Л — лесные, Л^c — серые лесные, П₂ — подзолистые, Т — торфянистые, Б — болотные. Леса: МЛ — мелколиственные, Б — бересклетные, Д — дубовые, С — сосновые, Е — еловые, К — кленовые. Другие угодья: П — пашни, Л — луга, Б — болота, БП — бугристые пески, ЗЛ — заболоченные луга. Ведущие экзогенные процессы: Э — эрозия, З — заболачивание, К — карст, П — перевивание.

Характеристики освоенности ландшафтов модельной территории

Номер ландшафта*	Общая площадь ландшафта, км ²	Структура использования земель, %				Плотность населения, чел./км ²	Преобладающие направления использования территории***	
		пахотные угодья	естественно-коренные угодья	лесные угодья	застроенные территории			
1	299	58	14	12	8	8	277	250
2	97	35	10	43	1	11	1	—
3	148	46	8	28	2	16	10	СХ, РК
4	12	71	7	—	10	12	120	СХ ^и
5	25	30	4	50	2	14	10	РК, СХ
6	105	14	5	76	1	4	1	РК, СХ
7	66	48	26	6	7	13	53	СХ ^и
8	24	19	44	19	2	16	12	СХ
9	44	46	34	1	1	18	11	СХ ^и
10	120	24	6	52	7	11	95	РК, СХ, ГЗ
11	112	7	4	66	3	20	274	РК, ПР, ГЗ
12	29	15	10	1	41	33	998	ГЗ, ГР, ПР
13	92	56	16	13	9	6	255	ГЗ, ПР, СХ ^и
							213	

* Характеристика ландшафтов приведена в табл. 1.

** К «прочим» отнесены поверхностные воды, болота, неудобья, резервные городские территории.

*** Направления использования территории: СХ — сельскохозяйственное, СХ^и — то же интенсивное; РК — рекреационное, ГЗ — городская застройка, ГР — резервные территории города, ПР — промплощадки.

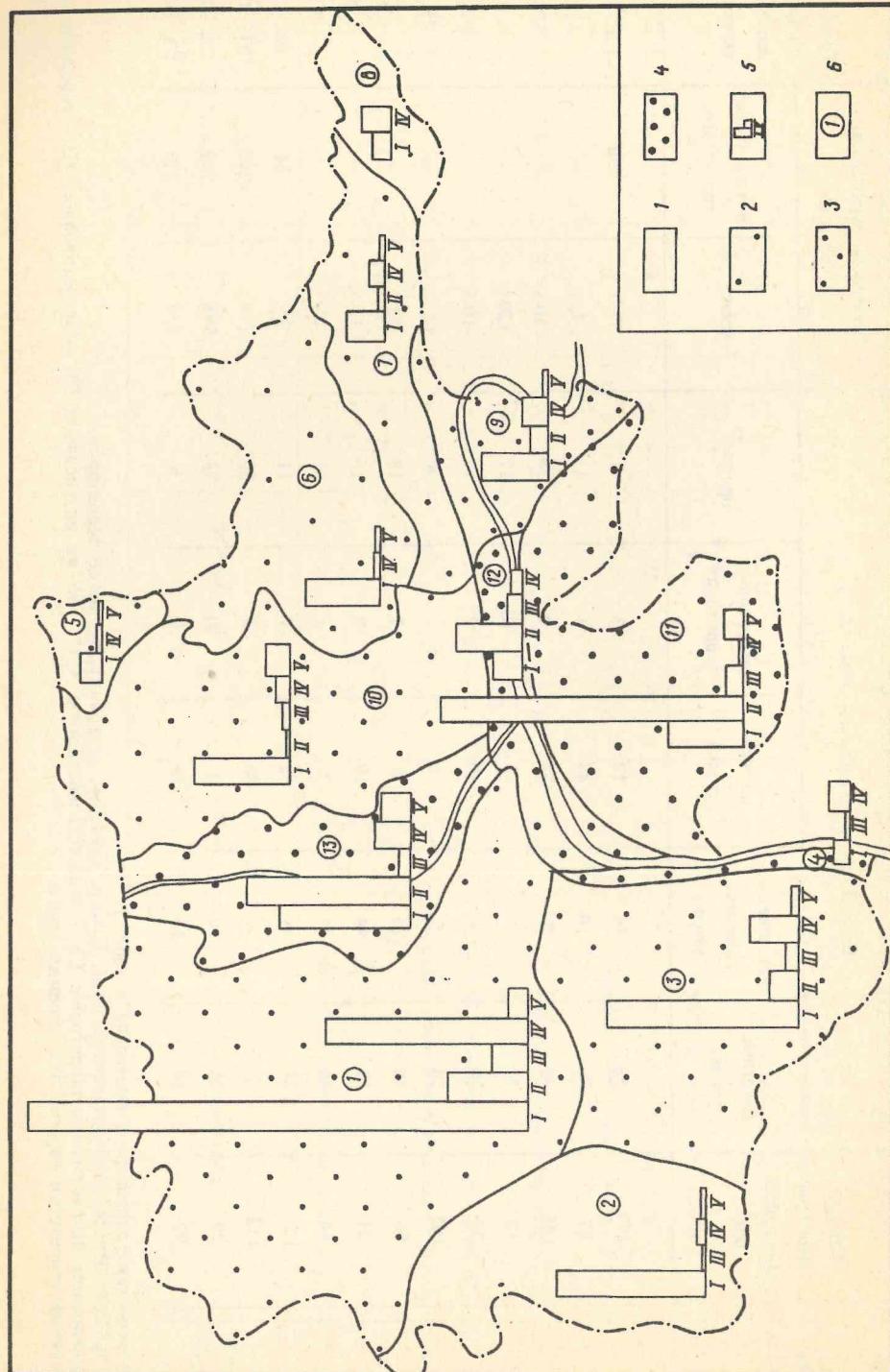


Рис. 1. Карта-схема оценки геоэкологической обстановки. Оценка геоэкологической обстановки (баллы/га): 1 — близкая к нормальной (< 15), 2 — допустимая ($15—30$), 3 — опасная ($30—60$), 4 — опасная (60); 5 — гистограммы оценки геоэкологической обстановки (площадь столбца 1 мм^2 соответствует величине оценки геоэкологической обстановки 2000 баллов), созданной в результате: I — развития эзогенных геологических процессов, II — воздействия промышленного производства, III — воздействия транспорта, IV — воздействия сельскохозяйственного производства, V — воздействия рекреантов; 6 — номер ландшафта

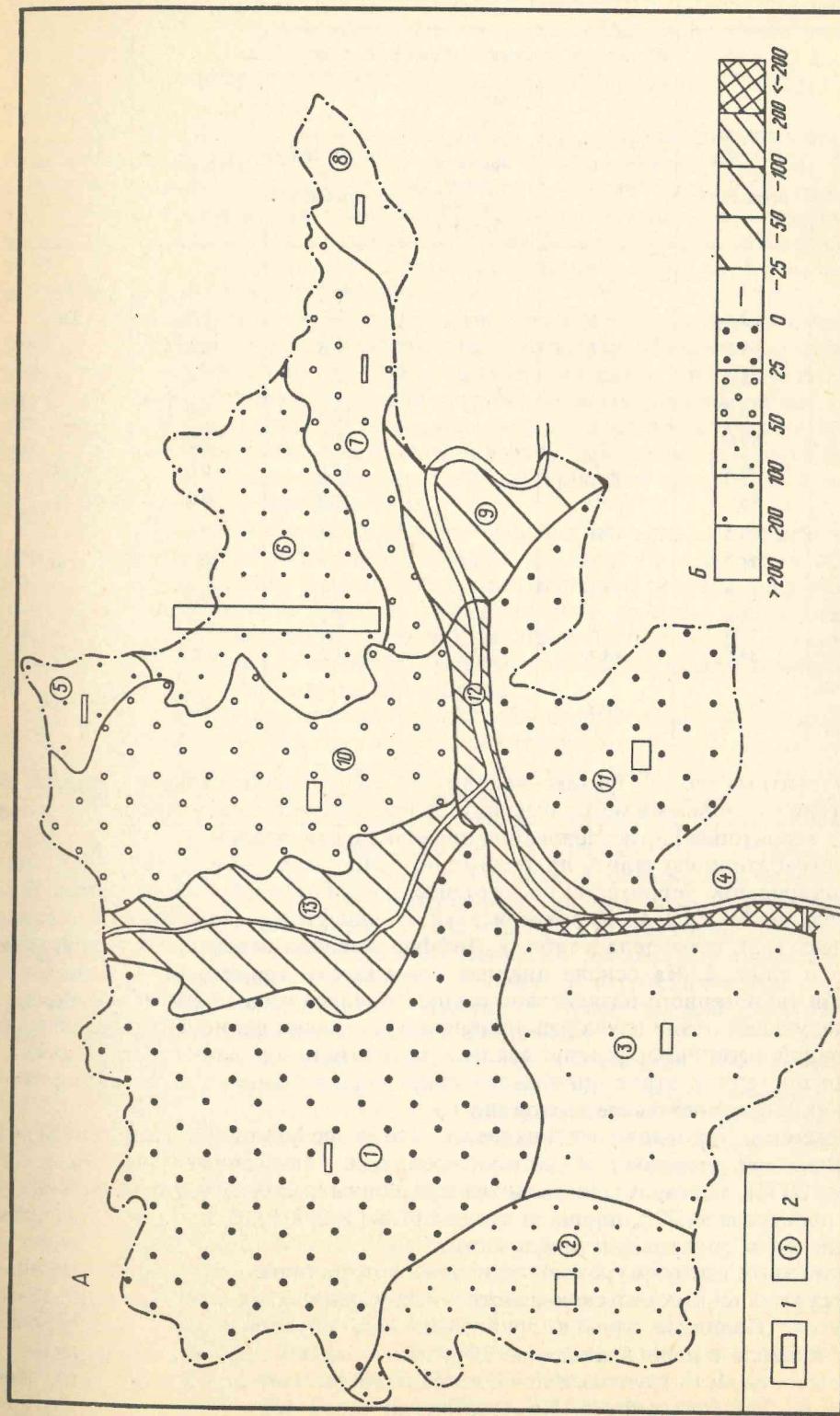


Рис. 2. А — карта-схема оценки геоэкологического состояния ландшафтов: 1 — доля территории со слабоизмененными природными компонентами (растительноностью) в общей площади ландшафта ($1 \text{ мм}^2 2\%$); 2 — номер ландшафта; Б — шкала оценки потенциального геоэкологического состояния территории, балл/га

Таблица 3

Структура последствий воздействия различных источников и оценка геоэкологической обстановки

Номер ландшафта	Структура последствий воздействия, %					Оценка геоэкологической обстановки, балл/га
	экзогенно-геологических процессов	промышленных предприятий	транспортных коммуникаций и других линейных объектов	сельскохозяйственных предприятий	рекреантов	
1	60,1	9,4	4,3	24,1	2,1	52
2	92,4	—	0,5	5,5	1,6	30
3	65,2	11,7	4,2	16,8	2,1	37
4	46,0	—	—	54,0	—	46
5	76,0	—	—	14,4	9,6	14
6	89,9	—	—	3,2	6,9	13
7	70,0	4,7	—	25,0	0,3	14
8	85,9	—	—	13,3	0,8	15
9	60,5	15,1	—	22,8	1,6	44
10	71,9	1,7	3,4	6,9	16,1	50
11	18,9	72,8	4,2	0,3	3,8	69
12	23,8	56,6	10,1	9,4	0,1	73
13	34,5	43,4	2,7	8,7	10,7	75
В целом по модельной территории	52,7	25,2	3,6	14,2	4,3	42

электромагнитных полей), физико-механическое (изменение свойств грунтов). В соответствии с основными методическими положениями геоэкологической оценки состояния территории [3] исследования проводились по этапам.

На первом этапе изучались природные особенности и выполнялось ландшафтное районирование территории по методике, разработанной Лабораторией ландшафтования МГУ [2, 4]. Характеристика ландшафтов, выделенных на картах-схемах (рис. 1, 2), приведена в табл. 1. Дифференциация освоенности территории отражена в табл. 2. На основе анализа освоенности территории и выявления источников техногенного воздействия осуществлялись геоэкологические оценки.

На следующем этапе изучались изменения состояния реципиентов по каждой операционной единице и рассчитывались показатели геоэкологической обстановки. На последнем этапе оценивался природный потенциал выделенных геосистем и их геоэкологическое состояние.

Проведенные исследования показали, что в результате техногенеза на рассматриваемой территории активизировались экзогенные геологические процессы (ЭГП). В результате развития эрозионных, карстово-суффозионных и эоловых процессов на 20% площади ландшафтов (1, 2, 8, 9, 12, 13-го) наблюдается деградация почв, грунтов, растительности.

Естественный высокий уровень грунтовых вод, наличие заболоченных площадей и переувлажненных сельскохозяйственных угодий характерны для 8, 12, 13-го ландшафтов. Поднятие уровня грунтовых вод, обусловленное интенсивным поливом, привело к переувлажнению 20% пахотных земель, изменению физико-механических свойств грунтов и почв, деградации растительных сообществ, особенно в 9 и 12-м ландшафтах. Последствиями таких воздействий стали потери

продуктивных сельскохозяйственных угодий и урожая, деформации зданий (при подтоплении городских территорий, в том числе из-за утечек из водонесущих коммуникаций — 11, 12-й ландшафты) и др. Вклад деградационного воздействия ЭГП в общую оценку сложившейся на рассматриваемой территории геоэкологической обстановки весьма существенный — около 53% (табл. 3). В структуре воздействий роль ЭГП в 11, 12, 13-м ландшафтах снижается за счет усиления техногенного воздействия.

Основными источниками техногенного воздействия служат предприятия промышленного производства, теплоэнергетики и транспорт. На модельной территории насчитывается более 30 промышленных предприятий, половина которых имеет машиностроительную и металлообрабатывающую специализацию и более 200 котельных. Транспортная нагрузка распределена неравномерно. Через 1, 3, 11, 12, 13-й ландшафты проходят автомобильные и железные дороги республиканского и областного значения.

Эти объекты являются источниками химического загрязнения атмосферного воздуха, подземных и поверхностных вод, почв, растительности. Помимо этого они несут статические и динамические нагрузки на грунты. Отходы промышленного производства, среди которых большая доля токсичных компонентов, складируются в отвалы. Деградационное воздействие связано в основном с деятельностью горнодобывающих предприятий, вибрационное и шумовое (кроме камнедробилок и взрывов в карьерах) характерно для транспорта и некоторых цехов промышленных предприятий.

Оценку геоэкологической обстановки выполняли с использованием данных по объемам выбросов (сбросов) загрязняющих веществ по отдельным объектам с учетом их агрессивности и площади распространения, степени деградации почв, лесных массивов и т. д. Расчеты применительно ко всем видам воздействий осуществляли с привлечением соответствующих методических и нормативных документов [1, 7 и др.]. Результаты оценки приводятся в сопоставимых баллах,звешенных через стоимостные показатели.

Естественно, что вклад техногенных объектов в общее ухудшение геоэкологической обстановки максимальный в ландшафтах (11—13), где сосредоточены основные промплощадки и транспортные коммуникации (табл. 2, рис. 1).

Интенсивное сельскохозяйственное использование территории сопровождается изменением в первую очередь биотических компонентов, а также трансформацией хозяйственных систем. В среднем 37% рассматриваемой территории распахано. К наиболее освоенным в сельскохозяйственном отношении следует отнести 1, 4, 13-й ландшафты, где доля пахотных угодий в общей структуре использования земель превысила 50%. Интенсивное сельскохозяйственное производство оказывается на активизации эрозионных процессов, особенно при неблагоприятных природных условиях и агротехнических приемах, на увеличении выноса механических частиц, а также загрязняющих веществ с территорий полей и животноводческих комплексов.

При оценке последствий техногенного воздействия учитывали объемы теряемой сельскохозяйственной продукции, загрязнение рек и водоемов продуктами смыва и стоков с сельскохозяйственных и селитебных территорий.

Наибольший вклад воздействия сельскохозяйственных предприятий в общую оценку наблюдается в 4-м (53,6%) и 7-ом (25%) ландшафтах, где наиболее интенсивно развито сельскохозяйственное производство. Однако не всегда наблюдается прямая корреляция получаемых величин геоэкологических оценок и степени сельскохозяйственной освоенности территории.

Совокупное воздействие различных источников привело к формированию пяти геохимических зон превышения концентраций химических элементов, оказывающих в той или иной степени влияние на здоровье населения.

Наиболее крупная зона комплексного загрязнения расположена вокруг города — райцентра. Она включает частично территории 1, 3, 10, 11, 12, 13-го ландшафтов. Здесь происходит интенсивное техногенное накопление F, Ca, P, а

также тяжелых металлов — Cu, Zn, Ag и др. Опасный и умеренно опасный уровни интегрального загрязнения компонентов ландшафтов могут служить одной из причин повышенной заболеваемости населения. На севере 1-го ландшафта загрязнение почв Р и Mn происходит вследствие избыточного внесения удобрений. Выявлено, что очаг загрязнения в долине р. Москвы (13-й ландшафт) не опасен для здоровья населения. По левому берегу р. Москвы отмечено избыточное техногенное накопление Ca (источник — кирпичное производство), что может служить предпосылкой уровской болезни. Уровень загрязнения компонентов ландшафтов в долине р. Оки (9, 11, 12-й ландшафты) — умеренно опасный для здоровья населения. Основной причиной загрязнения этих ландшафтов является город. В депонирующих средах происходит накопление токсичных тяжелых металлов Pb и Sn, а также F. Концентрация тяжелых металлов в поверхностных водах за счет сточных достигает опасного уровня.

Общая структура последствий различных видов воздействий, отражающая геоэкологическую обстановку, представлена в табл. 3 и на рис. 1. Геоэкологическая обстановка в настоящее время изменяется от допустимой в периферийных ландшафтах до критической в центральных ландшафтах. Анализ карты-схемы оценки геоэкологической обстановки позволяет сделать следующие выводы: а) максимальные значения — критическая обстановка, характерны для 11, 12, 13-го ландшафтов, где на 1 га приходится более 60 баллов; б) воздействие ЭГП равно или выше техногенного, особенно в ландшафтах 2, 5, 6, 8; в) в центральных ландшафтах роль ЭГП снижается не столько за счет меньшего развития процессов, сколько за счет усиления техногенного воздействия; г) из видов воздействия преобладает деградационное и интоксикационное; д) исключение в расчетах города из территории соответствующих ландшафтов изменяет картину оценок по 1, 11, 12, 13-му ландшафтам в сторону некоторого улучшения геоэкологической обстановки, одновременно резко ухудшая ситуацию на прилегающих к городу площадях. Это лишний раз доказывает, что город необходимо рассматривать как подсистему природных систем.

Итоговую геоэкологическую оценку территории при условии сохранения общих тенденций техногенных нагрузок предлагается приравнивать разнице между полученными количественными значениями сложившегося природного потенциала и интегральным показателем геоэкологической обстановки.

Природный потенциал оценивался как для малоиспользуемых территорий, так и в разной степени измененных. Полученные баллы взвешивались через стоимостные показатели.

На модельной территории, размещающейся в лесной зоне, наименее измененным природным компонентом являются лесные массивы. Максимальный «лесной потенциал» отмечается во 2, 6, 11-м ландшафтах. По результатам оценки выявился почвенно-ресурсный дефицит в 4, 5, 6-м ландшафтах. Рассматриваемая территория характеризуется достаточной водообильностью, как подземных водоносных горизонтов, так и поверхностных водотоков. Однако их загрязнение явилось причиной дефицита чистой воды, особенно в 12-м ландшафте. В итоге выявлено, что худшими геоэкологическими условиями (суммарный отрицательный потенциал) отличаются 4, 12, 13-й ландшафты (табл. 4).

При получении конечного результата вводился поправочный коэффициент, учитывающий долю площади ландшафта в границах модельной территории от общей ее площади. В итоге относительно стабильным состоянием характеризуются 3, 5 и 8-й ландшафты, а нестабильным — 4, 9, 12, 13-й. Остальные ландшафты находятся в переходном к нестабильному состоянию (рис. 2).

Исследованиями были установлены особенности подхода к геоэкологической оценке урбанизированных территорий, где преобладает воздействие техногенных факторов над природными, а среди реципиентов — человек и объекты социотехносферы над природными компонентами. Урбанизированная территория характеризуется, как правило, нестабильным состоянием.

В рассматриваемом примере урбанизированная территория практически охва-

Оценка природного потенциала ландшафтов (балл/га)

Номер ландшафта	Значения оценки потенциалов:			
	лесоресурсного	почвенно-ресурсного	водно-ресурсного	суммарного
1	6	118	-28	96
2	66	34	0	100
3	48	150	0	198
4	0	-47	-3	-50
5	60	2	0	62
6	114	1	0	115
7	12	34	1	47
8	30	63	0	93
9	-6	26	0	20
10	51	17	-1	67
11	69	21	-7	83
12	0	89	-104	-15
13	-66	34	-3	-35

тывает 12-й и 13-й ландшафты полностью и 1, 9, 11-й частично. Особенно резко изменяются значения геоэкологической оценки состояния урбанизированной территории в пределах ландшафтов 11-го (-134 балл/га при средней по этому ландшафту величине 8 балл/га) и 1-го (-26 балл/га при средней по ландшафту величине 20 балл/га). Средняя плотность населения на урбанизированной части территории составляет 800 чел./км², а геоэкологическая оценка равна -100 балл/га, при средних значениях соответственно 158 чел./км² и 31 балл/га для модельной территории в целом.

Выводы

1. Впервые реализован на модельной территории комплексный подход к количественной геоэкологической оценке ее состояния, позволяющий изучить поведение различных систем и выполнять геоэкологические оценки как для фактически существующих условий, так и для условий изменяющихся техногенных нагрузок.

2. Апробация геосистемного подхода подтвердила необходимость рассмотрения любой территории как природной структуры, и кроме того, показала эффективность предлагаемой количественной геоэкологической оценки.

3. Величина вклада воздействия экзогенных геологических процессов в оценку геоэкологического состояния ландшафта может быть больше, чем последствия техногенеза.

4. Разнообразие природно-хозяйственных условий модельной территории позволило проанализировать возможные сочетания факторов, определяющих смену геоэкологического состояния ландшафтов от стабильного через переходное к нестабильному.

5. Отрицательные геоэкологические оценки урбанизированных территорий связаны с изменением структуры геосистем из-за возрастающих техногенных нагрузок и активизации неблагоприятных геологических процессов.

6. Выполненные геоэкологические оценки состояния геосистем являются основой количественного анализа антропогенной динамики ландшафтов.

7. Количественный анализ прямых и обратных природно-хозяйственных связей в геосистемах позволяет определить истинные границы их урбанизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. М.: Наука, 1986. 74 с.
2. Заиканов В. Г. Особенности детального (1:2 000—1:10 000) инженерно-геокриологического картографирования месторождений полезных ископаемых Северной Якутии//Методы инженерно-геокриологической съемки. М.: ВСЕГИНГЕО, 1990. С. 157—169.
3. Заиканов В. Г., Минакова Т. Б. Методические основы оценки геоэкологической нестабильности урбанизированных территорий//Геоэкология. 1995 г. (в печати).
4. Кофф Г. Л., Минакова Т. Б., Бахирева Л. В. и др. Методические основы оценки техногенных изменений геологической среды городов. М.: Наука, 1990. 197 с.
5. Морфологическая структура географического ландшафта/Под ред. Н. А. Солнцева. М.: Изд-во МГУ, 1962. 54 с.
6. Солнцев Н. А. О морфологии природного географического ландшафта//Вопр. географии. 1949. Сб. 16. С. 61—86.
7. Экология и безопасность. Справочник/Под ред. Н. Г. Рыбальского. М.: ВНИИПИ, 1993. Т. 1, 2.

ИГЦ РАН

Поступила в редакцию
4.IV.1994

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

3 • 1995

УДК 624.131

© 1995 г. М. Г. ЕЗЕРСКИЙ, В. А. ЯКУБОВ

РЕШЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ НА УЧАСТКЕ РЯЗАНСКОГО КРЕМЛЯ

Описывается результаты геофизических (сейсмических и электрометрических) исследований на участке древнего кремля в г. Рязань (Россия), где в течение длительного времени деформируются каменные постройки XVII—XIX столетий. Геофизические данные позволили без дополнительного бурения скважин оконтурить древние озерно-болотные отложения, скрытые под техногенным слоем грунтов, и построить объемную геомеханическую модель основания здания дворца Олега.

Введение

Российские памятники истории и культуры, возведенные, как правило, на насыпных грунтах с большим содержанием органических веществ, в процессе всей своей истории испытывают деформации, связанные с неравномерными просадками фундаментов [2]. Провоцирующими факторами могут являться грунтовые воды естественного и техногенного происхождения, карстовые образования, в городах — строительство и функционирование метрополитенов и т. п. [8].

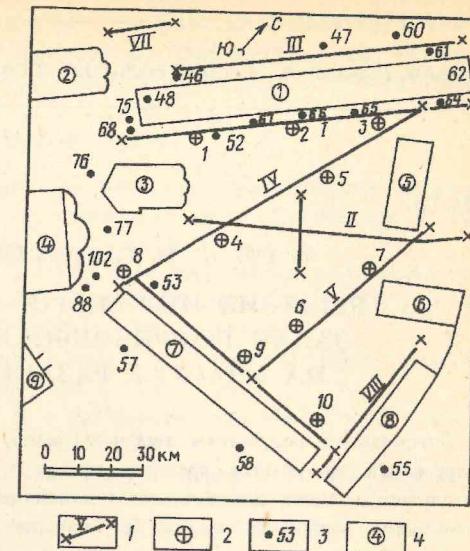
При исследовании инженерно-геологических причин деформаций памятников архитектуры в последние десятилетия широко используются геофизические методы электроразведки, «малой сейсмики», всевозможных зондирований как неразрушающих дистанционных методов исследования строения, состояния и свойств грунтов и их изменения во времени. Одно из достоинств геофизических методов — возможность получения непрерывного ряда данных вдоль линий (профилей) с любой заданной детальностью. Последнее позволяет, располагая профили по определенной схеме (сетке), строить карты распределения различных показателей свойств грунтов в пространстве (по глубине, в плоскостях, в объеме), выявлять зоны структурных нарушений и различного состояния [3]. Особенно расширились возможности геофизических методов, в частности сейсмических, с развитием цифровой компьютеризированной сейсмической аппаратуры, позволяющей упростить и ускорить получение сложнейшей геофизической информации непосредственно в полевых условиях.

В данной работе геофизические исследования были включены в комплекс инженерно-геологического изучения «глубинной охранной зоны» памятника архитектуры XVII—XIX вв., выполняемого ведущими научными сотрудниками Московского геологоразведочного института Е. И. Романовой и А. Г. Купцовым.

Каменные постройки Рязанского кремля в течение длительного времени испытывают деформации, причины которых исследователи трактуют по-разному. На участке расположения деформирующихся построек в 1948—1969 гг. были пробурены разведочные скважины, которые, однако, целевой инженерно-геологической картины не дали. В настоящее время для сохранения памятника архитектуры признано целесообразным ограничить объемы бурения за счет применения неразрушающих геофизических методов.

Таким образом, была поставлена цель геофизических исследований — уточ-

Рис. 1. Схема проведения геофизических исследований на территории кремля в г. Рязани. 1 — сейсмический профиль и его номер; 2 — точка ВЭЗ и ее номер; 3 — разведочная скважина и ее номер; 4 — каменные строения: 1 — дворец Олега, 2 — Христорождественский собор, 3 — Архангельский собор, 4 — Успенский собор, 5 — певческий корпус, 6 — административное здание, 7 — консистория, 8 — конюшни



нение инженерно-геологических условий участка расположения каменных построек Рязанского кремля.

Задачи исследований включают: 1) уточнение инженерно-геологического строения на площадке, прилегающей к зданию дворца Олега; 2) определение показателей физико-механических свойств грунтового массива и их распределения в пространстве (по глубине и латерали); 3) построение геомеханической модели грунтового основания.

Методы решения этих задач достаточно разработаны и применяются в изысканиях под строительство гражданских и промышленных сооружений [4].

При проведении геофизических исследований использовались сейсморазведочный корреляционный метод преломленных волн (КМПВ) и электроразведочный метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

Сейсмический метод был основным при исследовании строения, состояния и свойств пород, а электроразведочный — вспомогательным, для идентификации грунтов по совокупности геофизических параметров.

Схема расположения сейсмических профилей и точек ВЭЗ дана на рис. 1. Площадка исследований — зеленый газон 6400 м² — примыкает к зданию дворца Олега и ограничена со всех сторон каменными постройками: Архангельского собора, консисторского и певческого корпусов и конюшнями.

Краткие сведения об инженерно-геологических условиях территории

Кремлевский холм расположен в центральной части Рязани на правом берегу р. Трубеж, которая является в свою очередь правым притоком р. Оки. Река Трубеж окаймляет холм с севера; на востоке холм ограничен р. Лыбедь, являющейся притоком р. Трубеж. Рельеф участка равнинный со спокойным понижением в сторону р. Трубеж.

В геоморфологическом отношении территория представляет собой, по-видимому, моренный холм или останец флювиогляциальной террасы, к которой с северной стороны примыкают две аллювиальные террасы и пойма. Дворец Олега находится, по нашим предварительным данным, на сочленении двух террас. Геологическое строение участка неоднородно. В разрезе встречаются грунты, по литологическому составу являющиеся супесями, суглинками, глинями,

озерно-болотными торфяно-илисто-глинистыми отложениями (ТИГО) средне- и верхнечетвертичного возраста. Местами вскрыты отложения днепровской ледниковой морены.

Гидрологические условия характеризуются наличием грунтовых вод типа «верховодка». Первый от поверхности водоносный горизонт находится на глубине 18—20 м. «Верховодка» встречена в нескольких скважинах, преимущественно в суглинках (установившиеся уровни показаны в колонках скважин). Питание «верховодки» происходит за счет фильтрации в грунт атмосферных осадков, вследствие чего ее уровень подвержен резким сезонным колебаниям. В весенне-осенние периоды возможно стояние «верховодки» близко от поверхности земли. По данным химического анализа грунтовые воды «верховодки» оказались агрессивными по содержанию сульфатов для всех видов цементов, кроме сульфатостойких.

Нормативная глубина промерзания грунтов на участке равна 1,4 м (по карте нормативных глубин промерзания грунтов для Рязанской обл.).

Состояние каменных построек Рязанского кремля

Постройки на территории Рязанского кремля в течение длительного времени испытывали осадки и деформации. Здание Успенского собора (1693—1702 гг.) несколько столетий разрушалось и реставрировалось, стены трескались и отходили от сводов, проседая за фундаментами [5]. В 1805 г. были проведены восстановительные работы, после которых здание простояло около 100 лет, затем в нем вновь образовались трещины. К началу 50-х годов крупная трещина расколола собор с середины западной стены через своды на юго-восточный угол. Раскрытие ее вверху западной стены в 1950 г. достигло 25 см, а в 1953—65 см (частично за счет опавших кирпичей). Причиной осадок было признано наличие засыпанного в конце XVI века озера, упоминаемого в летописях, на берегу которого был заложен собор. Вскрытые геологическими скважинами торфяно-илисто-глинистые отложения (ТИГО) подтверждают наличие в данном месте древнего погребенного водоема. Фундамент собора был расширен и заглублен на 1,2 м (до отметки 112,0—112,5 м) и установлен на подстилающие суглинки, после чего осадки прекратились.

Судьба Успенского собора типична для многих построек, находящихся на прилегающей к нему территории (рис. 1). Наиболее серьезные деформации испытывает здание Архиерейского дома (дворца Олега), показанного на рис. 2, а, б. Дворец Олега (1653—1655 гг.) строился в три этапа. Самой древней является западная часть дома. Восточная часть палат пристроена в 1778—1780 гг., а в XIX в. она была перестроена. Со стороны южного фасада в центральной части здания наблюдаются две крупные наклонные сквозные трещины, уходящие от навеса крыльца вверх в западном и восточном направлениях (рис. 2, б). Зеркально отраженные трещины имеются и на северном фасаде здания. Вертикальные трещины раскрытием до 1 см отмечены на стыке здания с поздней восточной пристройкой. Происходит отрыв колонн вследствие просадок фундамента. Кирпичная кладка сильно повреждена (перекосы кирпичных слоев, выпадение отдельных кирпичей).

В меньшей степени повреждено здание консистории. Здесь наиболее деформируемой является центральная проседающая часть на стыке двух- и одноэтажного корпусов и восточное крыло административной части здания. Просадки хорошо видны на фотографиях (рис. 2) по искривлению линии карниза.

Значительные деформации претерпело здание конюшни. Здесь торцевая (южная) стена рассечена на всю высоту двумя вертикальными трещинами от фундамента до крыши.

В разное время деформировались и реставрировались постройки Певческого корпуса и Архангельского собора.

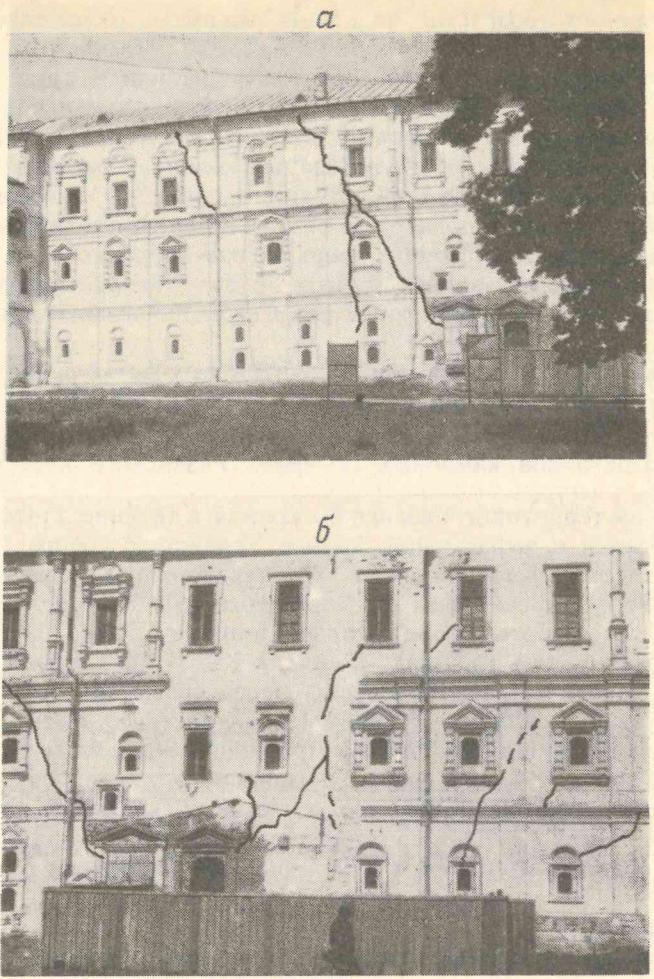


Рис. 2. Деформированные фасады каменных построек кремля: а — южный фасад дворца Олега с трещиной в восточном крыле; б — искривление карниза вследствие просадки центральной и западной частей здания консистории

Методика и техника исследований и интерпретация данных

Сейсмические исследования проводили методом преломленных волн по 7-точечной системе наблюдений с возбуждением упругих волн ударом. Сейсмоприемники СВ-30 устанавливали с шагом 2 м. Для регистрации использовали инженерно-геофизическую компьютеризированную станцию с накоплением «Diogen-1», разработанную в одноименной специализированной фирме под руководством Б. А. Корнилова. При каждой расстановке удары производили в семи пунктах (ПУ): по одному на концах расстановки, один в центре и на расстоянии 22 и 44 м от каждого конца. Это позволило изучить массив до глубин 16—20 м.

Материалы сейсмических исследований обрабатывали с помощью программы SEISMIC-GEOTON, разработанной В. А. Якубовым для РС IBM совместимых компьютеров на языке TURBO PASCAL 5.5. Особенностью данной программы является возможность построения структурных разрезов в изолиниях скоро-

стей V_p , что в свою очередь позволяет детально расчленить разрез по упругим свойствам. Комплекс SEISMIC-GEOTON включает следующие программы:

текстовый редактор для ввода и редактирования информации о месте проведения работ, координатах и топографии сейсмических профилей, а также временах прихода волн;

графический просмотр сейсмических трасс с целью выделения сейсмических волн и снятия их времен прихода;

графический редактор гидографов сейсмических волн, позволяющий просматривать гидографы и взаимно увязывать их на профилях;

программу обработки гидографов сейсмических волн методом t на основании обобщенного решения обратной кинематической задачи сейсморазведки в классе кусочно-непрерывных скоростных функций [1];

программу построения трехмерной сейсмоскоростной модели исследуемой геологической среды по совокупности данных, полученных по сейсмическим профилям.

Все графические построения, проводимые программным комплексом SEISMIC-GEOTON, выводятся на графопостроитель или матричный принтер. В программном комплексе имеется также утилита, настраивающая программы на конфигурацию используемой ЭВМ.

На основании дифференцированных по скоростям разрезов V_p с помощью ПЭВМ строились карты-срезы в латеральных плоскостях и по границам слоев.

Для определения изменений электрического сопротивления пород по глубине использовали метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Измерения выполняли стандартной аппаратурой низкой частоты АНЧ-3 в 10 точках, расположенных по четырем профилям ВЭЗ. По результатам измерений строили кривые ВЭЗ изменения кажущихся удельных электросопротивлений с глубиной, по которым далее с помощью ЭВМ определяли геоэлектрические слои и истинные удельные электросопротивления для каждого слоя. Электрометрические данные обрабатывали с помощью пакета программ интерпретации кривых ВЭЗ «IPI», разработанных на кафедре геофизики МГУ им. М. В. Ломоносова под руководством проф. В. А. Шевнина [7].

Комплексирование сейсмических и электрометрических параметров позволило с большой надежностью расчленить толщу по глубине на литологические разности.

Результаты исследований

Строение грунтового массива. Разрез по одному из основных профилей $N1 - R$, протягивающемуся вдоль южного фасада дворца Олега, представлен на рис. 3. Сейсмогеологический разрез характеризуется наличием двух преломляющих границ. Первая граница резко выражена в центральной части профиля и разделяет грунты со скоростью $V_p = 0,25 \div 0,30$ км/с (верхний слой) и со скоростью $V_p > 0,55$ км/с (второй слой). Вторая граница (наблюдалась на глубинах от 2 до 14 м) в начальной части профиля выражена неявно. Начиная от ПК 0 + 30 м различие скоростей в грунте над и под границей начинает возрастать от 1,8 (0,40 и 0,70 км/с) до 3 раз (0,6 и 1,8 км/с) в центральной части профиля; в конечной его части различие скоростей над и под границей возрастает до 7 раз (0,25 и 1,8 км/с). Обращает на себя внимание куполообразная высокоскоростная структура в центральной части профиля ($V_p = 0,60 \div 0,65$ км/с), идентифицируемая с наличием в инженерно-геологическом разрезе куполообразной структуры, сложенной суглинками. Разрез $N1$ достаточно типичен для участка исследований.

Для получения пространственного представления о структуре скоростных полей построены карты-срезы V_p в латеральной плоскости на разных высотных отметках по преломляющей границе, а также карты рельефа различных сейсмогеологических границ.

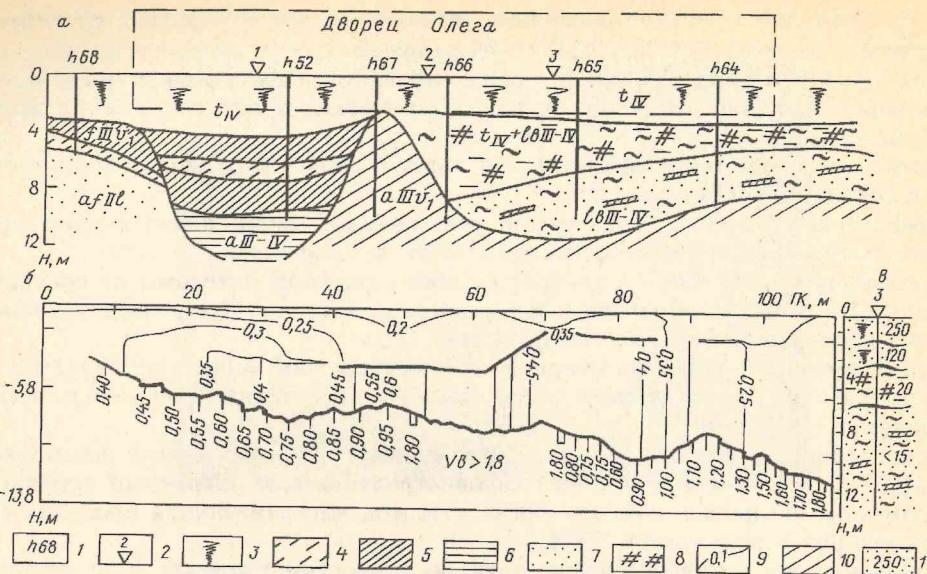


Рис. 3. Сейсмогеологический разрез вдоль профиля I: а — инженерно-геологический разрез; б — скоростной разрез; в — электрический разрез в точке ВЭЗ-3. 1 — номер скважины, 2 — номер точки ВЭЗ, 3 — техногенные грунты, 4 — супесь, 5 — суглинок, 6 — глина, 7 — песок, 8 — болотно-озерные отложения, 9 — изолинии V_p , км/с, 10 — зона повышенных скоростей $V_p > 0,6$ км/с, 11 — удельное электропротивление грунта, Ом/м

На рис. 4 представлена карта-срез в скоростях сейсмических волн на отметке $-5,0$ м (за нулевую отметку принята поверхность земли). На карте выделяется зона повышенных скоростей $V_p = 0,65 \div 0,85$ км/с в центральной части под зданием дворца Олега. На периферии здания скорости волн уменьшаются: у левой части здания $V_p = 0,4$ км/с, а у правой $-0,25\text{--}0,30$ км/с. Анализируя данную карту, можно отметить основные особенности скоростного строения массива на отметке $-5,0$ м: резкую скоростную неоднородность массива под зданием с повышенными упругими характеристиками в центре и низкими значениями V_p в концах здания (особенно в правом северо-восточном крыле); наличие обширной низкоскоростной области ($V_p < 0,35$ км/с) в северо-восточной части площадки. Эта зона протягивается под центральную и восточную торцевую части консисторского корпуса, а также под северо-восточную часть Архангельского собора.

Представление о пространственном положении границ дает карта подошвы низкоскоростного слоя (по изолинии $V_p = 0,35$ км/с).

Карта (рис. 5) показывает закономерное увеличение глубины низкоскоростного слоя с запада на восток. Наиболее высоко ($h < 2,0$ м) граница залегает под западной половиной дворца Олега, плавно углубляясь в восточном направлении. Наибольших глубин низкоскоростной слой достигает в восточной части под зданием дворца Олега (9—11 м), под восточным крылом консистории (8—10 м) и вдоль западного фасада конюшни, а также в центральной части консистории ($h > 7$ м) и под Архангельским собором ($h > 7$ м).

Показатели физико-механических свойств пород

На основании комплексирования сейсмических и электрометрических данных и увязки их с реальными инженерно-геологическими разрезами проведена разработка критериев идентификации тех или иных типов пород по совокупности их геофизических параметров и построены связи между измеряемыми параметрами (скоростями продольных волн V_p и поперечных волн V_s) и показателями физико-

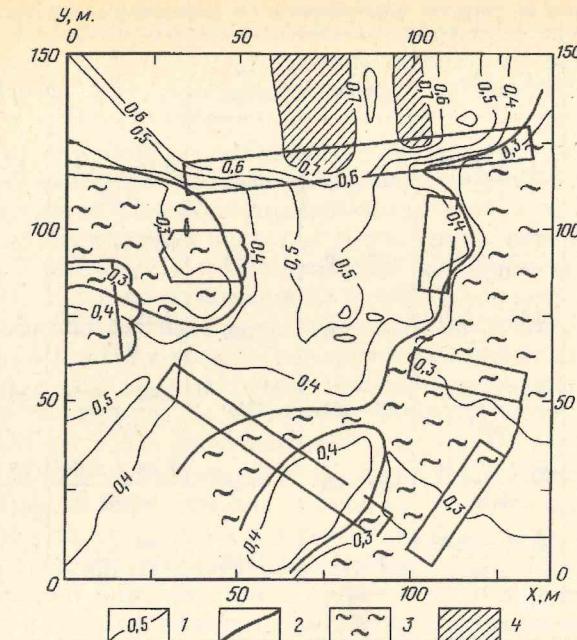


Рис. 4. План-срез на отметке -5 м от поверхности в изолиниях скоростей V_p . 1 — изолинии V_p , км/с; 2 — изолиния $V_p = 0,35$ км/с — граница зоны болотно-озерных отложений; 3 — область низких скоростей $V_p < 0,35$ км/с — болотно-озерные отложения; 4 — область повышенных скоростей $V_p > 0,70$ км/с — суглинки

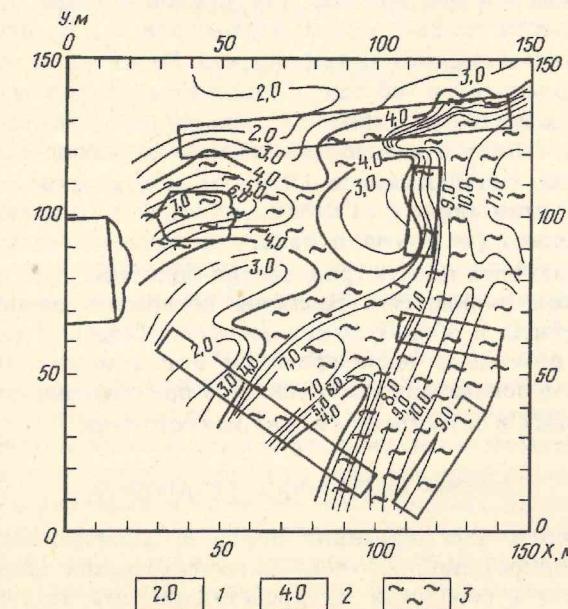


Рис. 5. Карта глубин подошвы низкоскоростного слоя $V_p = 0,35$ км/с — дна древнего водоема, 1 — изолинии глубин, м; 2 — изолиния максимальной глубины насыпного слоя — 4,0 м; 3 — озерно-болотные отложения

Основные показатели упругих электрических и деформационных свойств грунтов

Наименование типа пород	V_p , км/с	ρ , Ом/м	γ_0 , кг/м ³	e	$E_{\text{деф}}$, МПа	$R_0 \cdot 10^5$, Па
Техногенные отложения	$0,15 - 0,40^*$ 0,27	60—400	1700	$0,56 - 0,97$ 0,63	6—18 13	— 2,6
Глина тугопластичная	$0,40 - 1,30$ 0,79	10—20	1390	$0,55 - 0,85$ 0,77	16—30 20	2,5—4,5 3,3
Суглинок тугопластичный	$0,35 - 0,80$ 0,43	15—40	1700	$0,65 - 0,85$ 0,75	8—27 14	1,5—2,1 1,8
Супесь пластичная	$0,25 - 0,70$ 0,43	50—100	1700	$0,40 - 0,50$ 0,45	26—50 32	2,0—3,0 2,5
Песок мелкий	$0,35 - 0,55$ 0,31	100—200	1660	$0,46 - 0,50$ 0,48	25—40 36	3,0—4,0 3,5
Болотно-озерные отложения	$0,20 - 0,40$ 0,31	5—15	1380	$0,80 - 1,12$ 1,10	1,5—3,5 2,5	1,0—2,0 1,5

* Числитель — пределы изменения показателя, знаменатель — среднее значение показателя.

механических свойств — такими, как динамический модуль упругости E_d , модуль полной $E_{\text{деф}}$ и длительной E_t деформации, сцепление C , коэффициент трения $\text{tg } \varphi$, пустотность n и коэффициент пористости e , показатель естественной влажности W .

В результате проведенного анализа для каждой группы пород определены диапазоны изменчивости геофизических параметров V_p , V_s , отношения V_p/V_s и связанного с ним динамического коэффициента Пуассона μ , сопротивления ρ . Основные данные приведены в таблице. Техногенные грунты и озерно-болотные отложения при одинаково низких значениях упругих параметров $V_p < 0,35 - 0,40$ км/с имеют разные величины электросопротивлений, которые для грунтов ТИГО составляют менее 15 Ом/м, а для техногенных грунтов — 60—400 Ом/м. От глин породы ТИГО при близких значениях электросопротивлений значительно (в 2 раза и более) отличаются скоростями V_p . Аналогично, по сочетанию двух параметров, озерно-болотные грунты различаются и с другими литотипами пород. Эти различия позволяют однозначно выделить озерно-болотные грунты в общем инженерно-геологическом разрезе. Добавим, что значительную помощь в идентификации пород может оказать величина V_p/V_s (эффективность показателя увеличивается при обводнении пород). Изучаемые грунты находились в естественно влажном состоянии.

Анализ полученных результатов

Используя критерии идентификации пород по геофизическим параметрам, попробуем дать интерпретацию полученных геофизических данных. Анализ проведем по плану-срезу в скоростях V_p , представленному на рис. 4, на который нанесены значения электросопротивлений, соответствующие данной глубине в точках проведения ВЭЗ, а также геологические скважины и породы, залегающие на глубине среза согласно описаниям скважин.

На плане привлекает внимание низкоскоростная зона пород с $V_p < 0,35$ км/с. В соответствии с таблицей это могут быть как техногенные грунты, так и грунты ТИГО. Первые характеризуются значениями $\rho = 60 - 400$ Ом/с, последние —

5—15 Ом/м. Данные разведочных скважин и «точечные» измерения электросопротивлений методом ВЭЗ позволяют идентифицировать низкоскоростное поле как озерно-болотные отложения. Граница $V_p = 0,35$ км/с очерчивает контур древнего озера.

В свете высказанных соображений карта глубин подошвы низкоскоростного слоя на рис. 5 фактически является картой подошвы техногенных и озерных отложений. Анализ геологических описаний скважин показывает, что мощность насыпного слоя в пределах данной территории не более 4 м. Поэтому изолиния глубин 4,0 м может с высокой степенью вероятности рассматриваться как граница между насыпными грунтами ($h < 4,0$) и озерно-болотными ($h > 4,0$) отложениями. На чертеже эта изолиния также дает приблизительное представление о контуре древнего озера, отложения которого вместе с насыпными грунтами сегодня являются основанием некоторых зданий, в частности восточных частей дворца Олега, консистории, конюшни и певческого корпуса. Не исключено наличие древнего озерца в контуре изолиний $V_p < 0,35$ км/с под Архангельским собором. На это указывает наличие значений $\rho = 10 - 15$ Ом/м в точке ВЭЗ-4. Обратим внимание на то, что контуры «озера», выделенные на карте глубин, хорошо согласуются с конфигурацией аналогичной границы низкоскоростных грунтов ($V_p < 0,35$ км/с) на рис. 4, что свидетельствует о надежности полученных результатов.

Различие скоростей упругих волн в озерно-болотных и вмещающих грунтах находит отражение в существенном различии показателей деформационных свойств — общих модулей деформации $E_{\text{деф}}$. Оценки модулей деформации, выполненные по корреляционным зависимостям работы [4], показывают, что слой озерно-болотных ТИГО резко выделяется из всей совокупности грунтов низкими (особенно деформационными) показателями. Так, значения $E_{\text{деф}} = 2,5$ МПа для этого типа грунта в 6—15 раз меньше аналогичных показателей других грунтов. Культурный слой и суглинки имеют близкие средние значения $E_{\text{деф}} = 13 - 15$ МПа, в верхней части разреза эти показатели имеют минимальные величины $E_{\text{деф}} = 6 - 10$ МПа.

Обсуждение результатов

Результаты наших исследований показывают, что сейсморазведка, выполненная методом КМПВ с использованием программы SEISMIC-GEOTON, позволила детализировать структуру массива по показателям физико-механических свойств грунтов, и в частности по состоянию пород как по глубине, так и в латеральных плоскостях и на границе преломления, разделяющей грунты с резко различными свойствами. Успешное применение сейсмических методов в данном случае обусловлено широким диапазоном изменчивости скоростей продольных волн в верхней части разреза, составляющим 0,25—1,80 км/с, т. е. различием минимальных и максимальных значений практически на порядок. Именно нижний предел значений V_p (0,25—0,35 км/с) имеют озерно-болотные грунты, составляющие предмет поиска в грунтовом массиве. Их отличие от техногенных пород, имеющих близкие значения упругих параметров, заключается в существенном (более чем в 4 раза) различии электрических свойств этих грунтов, на чем и построен успех комплексной интерпретации материалов исследований. Помимо чисто структурной задачи в данном случае успешно решена проблема построения геомеханической модели основания, главным отличительным признаком которой является наличие озерно-болотных отложений, имеющих модули деформации (в среднем $E_{\text{деф}} = 2,5$ МПа) на порядок более низкие, чем у других грунтов (15—35 МПа).

Неоднородность строения пород основания создает (при таких различиях в показателях) резкую неоднородность геомеханических свойств грунтов по площади и глубине массива, что хорошо видно по распределению скоростей волн на рис. 3 и 4. Под центральной частью здания дворца залегают плотные суглинки (рис. 3, a) со скоростями $V_p > 0,60$ км/с (рис. 3, b) и модулем деформации от 8 до 27 МПа. Не исключено, что ядро суглинков находится в напряженном состоянии.

Правое крыло здания опирается на насыпной слой, имеющий $E_{\text{деф}} = 6-18$ МПа, подстилаемый озерно-болотным слоем с модулем $E_{\text{деф}} = 1,5-3,5$ МПа. Наконец, левое крыло по основной площади опирается на слой суглинков с $E_{\text{деф}} = 8-14$ МПа, подстилаемый в центральной части глинами, а в левой (западной) части слабодеформируемыми супесями с $E_{\text{деф}} = 26 \div 50$ МПа. Таким образом, левая часть здания вдоль срединной оси опирается по краям на менее деформируемые грунты, чем в центре. Таким образом, в целом картина осадок должна быть такой, что здание как бы разламывается посередине на ядре суглинков и проседает в центре левого крыла. Если учитывать неоднородность основания в плане (рис. 4), то все постройки территории, подстилаемые ТИГО с аномально низкими скоростями $V_p < 0,35$ км/с и соответствующими деформационными показателями, должны испытывать осадки или просадки в зонах их опирания на озерно-болотные отложения — левый угол южного фасада дворца, центральная и восточная часть консистории, восточная половина певческого корпуса и Архангельского собора, здание конюшни. Низкие реологические свойства ТИГО обусловливают длительные деформации каменных построек кремля, полностью или частично возведенных на озерно-болотных грунтах. Наблюдения за зданиями показывают, что деформационные процессы не завершились и до настоящего времени. Это хорошо видно по характеру имеющихся и появляющихся вновь повреждений дворца Олега (рис. 2, а, б), просадкам здания консистории и конюшен. Низкие значения скоростей упругих волн в толще пород этого типа свидетельствуют о их высокой пористости и способности к дальнейшему деформированию, а неоднородность пористости на контакте с более плотными породами создает благоприятные условия для их деформаций в приконтактной зоне с ТИГО.

Заключение

Геофизические методы, в использованной нами модификации при ограниченном количестве разведочных выработок и минимальном вмешательстве в природную среду, имеют большие перспективы для применения на участках расположения памятников истории и культуры и других объектов, ограничивающих такое вмешательство.

Авторы выражают благодарность Е. И. Романовой, А. Г. Купцову и директору Рязанского кремля Л. Д. Максимовой за полезное, интересное и приятное сотрудничество.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бурмин В. Ю. Формула обращения для разрывных гидографов рефрагированных волн // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1980. № 6. С. 101—106.
- Гендель Э. М. Инженерные работы при реставрации памятников архитектуры. М.: Стройиздат, 1980. С. 19—37.
- Ляхович Ф. М., Хмелевской В. К., Ященко З. Г. Инженерная геофизика. М.: Недра, 1989. 253 с.
- Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами. М.: ВНИИТрансстрой, 1985. 64 с.
- Михайловский Е. Консервация Успенского собора в Рязани // Теория и практика реставрационных работ. М., 1972. С. 64—74.
- Сейсморазведка. Справочник геофизика. М.: Недра, 1981.
- Электрическое зондирование геологической среды. Ч. II./Под ред. В. К. Хмелевского, В. А. Шевнина. М.: Изд-во МГУ, 1992. С. 68—73.
- Legget R. F. Cities and geology. N. Y.: McGraw-Hill Book Comp. 1973.

Московское Акционерное общество
закрытого типа ИНГЕОКОМ

Предприятие геофизических изысканий
и исследований «Геотон»

Поступила в редакцию
18.V.1994

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

3 · 1995

УДК 624.131

© 1995 г. В. М. ГОЛЬДЕРГ

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИГОНОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Характеризуется влияние отходов на природную среду. Отмечаются особенности воздействия на геологическую среду свалок твердых отходов и накопителей сточных вод. Обоснование размещения свалок отходов включает оценку защищенности подземных вод, изучение взаимодействия в системе вода — порода, прогноз качества воды на водозаборах и разгрузки в реки. Анализируется закачка стоков в глубокие горизонты с позиций накопленного опыта проведения этих работ. Выделяются экологические последствия загрязнения подземных вод.

Загрязнение природной среды — тяжкая проблема современности. Оно имеет далеко идущие санитарные и экологические последствия и несет в себе угрозу жизни на земле. Основной «вклад» в загрязнение природной среды вносят отходы — жидкие, твердые и газообразные. Проблема отходов тесно связана с изъятием веществ из глубин недр, их переводом на поверхность земли непосредственно в жизненную среду, среду обитания человека. С жидкими и твердыми отходами связаны преимущественно локальные контрастные аномалии. Газодымовые отходы, выбрасываемые в воздушное пространство и распространяющиеся на большие расстояния, влияют на фоновое качество природной среды, и это не менее опасно, чем резко аномальное загрязнение на локальных участках. Последствия изменения фонового качества обладают эффектом «даленодействия»: они проявляются не сразу, а спустя некоторое время, когда постепенное накопление количественных изменений природной среды переводит в ее новое качественное состояние, оказывающее негативное влияние на растительность и живые организмы.

Загрязняющий потенциал газодымовых выбросов очень велик. Об этом свидетельствуют цифры глобальных выбросов металлов в атмосферу, тыс. т: свинец — 2000, цинк — 840, никель — 98, хром — 94, кадмий — 6. Десятками миллионов тонн исчисляются выбросы в атмосферу окислов серы и азота, с которыми связано образование кислотных дождей. Их выпадение на поверхность земли способствует появлению в природных водах токсичных веществ, в частности кадмия и алюминия, находившихся до выпадения кислых осадков в связанном состоянии в породах.

Особую опасность представляют радиоактивные отходы, токсичные трудно очищаемые промышленные сточные воды. Степень опасности отходов может быть выражена через индекс токсичности вещества, который определяется в зависимости от величины его предельно допустимого содержания, растворимости в воде и содержания в общей массе отходов [1].

Если в отходах содержится несколько опасных веществ, то сначала определяется индекс токсичности для каждого из них, а затем по их сумме находится класс токсичности отходов в целом. По величине суммарного индекса выделяются четыре класса токсичности: I — чрезвычайно опасные, II — высокоопасные, III — умеренно опасные, IV — малоопасные. Данная классификация согласуется с Международным регистром потенциально опасных химических веществ (Женева, 1985 г.). К наиболее токсичным химическим веществам, включенным в I класс опасности, в частности, относятся: хлорорганические соединения, ртуть,

бенз(а)пирен, мышьяк и его соединения, нефтепродукты, производные анилина, бензол, фосфорогенные соединения, соли кадмия, свинца и хрома, фенол, хлорбензол, никель и др.

Приведем сведения о «производстве» опасных отходов в ряде стран Европы, млн.т/год: Германия — 4,9; Франция — 4,0; Италия — 3,8; Великобритания — 3,7; Испания — 1,7; Португалия — 1,0; Нидерланды — 1,0; Бельгия — 0,7; Дания — 0,5; Греция — 0,3; Ирландия — 0,08; Люксембург — 0,08.

Удаление отходов (твердых и жидким) производится, в основном, в поверхностные земляные приемники — накопители стоков, свалки твердых отходов, поля фильтрации. Эти приемники отходов, в особенности накопители стоков, представляют наибольшую опасность для природной среды, они являются основными источниками загрязнения подземных вод. Небольшая часть особенно опасных и токсичных сточных вод удаляется посредством закачки через скважины в глубокие водоносные горизонты. Но это производится в ограниченных размерах и не является мерой повсеместного применения.

Масштабы воздействия поверхностных земляных приемников отходов на геологическую среду и подземные воды определяются не только их интенсивным загрязнением, но и прежде всего многочисленностью этих объектов.

Так, по данным инвентаризации на территории бывшего СССР установлено около 30 тыс. санкционированных приемников отходов, из них 27% — накопители промышленных и бытовых сточных вод, 25% — накопители (свалки и полигоны) твердых отходов, 24% — накопители животноводческих отходов, 19% — поля фильтрации. Только в г. Москве и Московской обл. имеется около 380 официальных свалок твердых отходов. В г. Дзержинске в настоящее время функционирует 19 свалок отходов и примерно столько же старых заброшенных свалок.

Не меньшую опасность для природной среды представляют старые бездействующие свалки, на которые прекращен сброс отходов. В этом смысле они действительно бездействующие, но в течение длительного времени даже после прекращения функционирования в качестве приемника отходов они продолжают оставаться источником загрязнения подземных вод и недр.

Опасность старых заброшенных свалок определяется их большим количеством. Так, например, в Германии известно около 40 тыс. таких свалок. Опасность существования старых свалок усугубляется еще и тем, что они уже не на виду, о них забывают, во многих случаях даже не знают, где они находятся, в то время как они продолжают оставаться источниками загрязнения, и это неожиданно и вроде бы необъяснимо проявляется и дает о себе знать.

Не меньше количество официально не разрешенных, так называемых, «диких» свалок.

Санкционированные действующие, старые заброшенные и «дикие» (действующие и заброшенные) свалки формируют разной степени интенсивности аномальные (по химическим, температурным и газовым показателям) зоны, негативно воздействующие на подземные воды. Учитывая огромное количество таких свалок, подземные воды оказываются под достаточно плотной сеткой отходов.

Участки крупных накопителей отходов по существу являются дефектными и геопатогенными зонами геологической среды. В качестве примера таковых можно привести Тимоховскую свалку отходов в Ногинском районе Московской обл., занимающую площадь ~110 га.

По воздействию на подземные воды накопители сточных вод и свалки твердых отходов существенно различаются.

Накопители сточных вод вследствие больших утечек из них и проникновения в водоносный горизонт (главным образом в горизонт грунтовых вод) значительных количеств стоков, расход которых составляет от нескольких тысяч до десятков тысяч кубометров в сутки, создают значительное гидродинамическое возмущение в водоносном горизонте, образуют большие по размерам области загрязнения с высоким содержанием загрязняющих веществ. В самом накопителе может

происходить перемешивание и усреднение сбрасываемых в него стоков и такими же усредненными в известной степени являются фильтрующиеся из него в горизонт грунтовых вод стоки. Накопители сточных вод, в особенности промышленных (например, предприятий химической промышленности), могут занимать большие площади, радиус которых составляет несколько километров. Огражденные дамбами они содержат в себе огромные объемы сточных вод. Так, кислотонакопитель ПО «Титан» в степном Крыму имеет площадь ~50 км², высота сточных вод в нем достигает 20—25 м. Прорыв дамб таких накопителей представляет катастрофу для прилегающих территорий. Достаточно вспомнить прорыв шламонакопителя в с. Сарбулак (под Алма-Атой) или прорыв накопителя сточных вод химического завода в г. Стебники (Предкарпатье). Большие по площади, переполненные накопители стоков создают, как уже упоминалось выше, даже в обычном эксплуатационном состоянии дефектные геопатогенные зоны, потому что их воздействию подвержены не только водоносные горизонты, куда «проваливаются» фильтрующие стоки, но и вся прилегающая к ним территория среды обитания человека. Говоря об опасности таких накопителей сточных вод для окружающей природной среды, их можно сравнить с минами замедленного действия.

Другая картина имеет место на свалках твердых отходов. На них под влиянием дождевых и талых вод за счет растворения и выщелачивания веществ из твердых материалов образуется фильтрат. Вследствие резко неоднородного состава материалов свалки таким же неоднородным является образующийся фильтрат в разных местах свалки и соответственно неоднородны фильтрующиеся из свалки стоки. Важнейшая особенность этих свалок обусловлена образованием на них сравнительно небольших количеств фильтрата и небольших по сравнению с накопителями сточных вод расходов фильтрующихся стоков. Эти расходы составляют (по оценкам Б. В. Трушина) от нескольких десятков до нескольких сотен м³/сут, что на один — два порядка меньше, чем в накопителях сточных вод. Поэтому гидравлическое воздействие свалки твердых отходов на водоносный горизонт сравнительно невелико.

По этой причине небольшими по размерам являются области загрязнения в водоносном горизонте. Значительная часть фильтрующихся стоков может расходоваться на насыщение зоны аэрации, особенно при большой ее мощности. Сравнительно небольшой расход фильтрующихся сточных вод и малое возмущение водоносного горизонта — характерные показатели свалок твердых отходов по их взаимодействию с подземными водами.

На свалках твердых отходов помимо гидрогеохимической аномалии формируются тепловая и газовая аномалии. Характерным является образование биогаза (метан, углекислый газ), сопровождающееся выделением тепла. Вследствие этого температура в теле свалки составляет 40—50° С, достигая нередко 70—80° С и выше, что способствует самовозгоранию. На участке свалки формируется «остров тепла», который может влиять на подстилающие породы зоны аэрации и горизонт грунтовых вод. Повышение температуры подземных вод будет способствовать развитию в них микрофлоры и микрофауны и в целом биологическому загрязнению, повышению растворяющей способности, изменению газового режима и уменьшению содержания растворенного кислорода.

Свалки отходов через разгрузку загрязненных ими подземных вод могут оставить свой «след» на близлежащих реках и водоемах. Разгрузка загрязненных подземных вод может оказаться индикатором, указывающим на наличие действующей или старой заброшенной свалки отходов. Поэтому в районах предполагаемого захоронения отработанных свалок целесообразно проведение гидрохимических измерений по русловым профилям, направленным вдоль того берега реки, со стороны которого ожидается разгрузка загрязненных подземных вод.

При размещении приемников отходов обязательно должна учитываться угроза загрязнения подземных вод и водозаборных сооружений. Во многих случаях фактор опасности загрязнения подземных вод является главным при решении вопросов размещения отходов.

Поэтому выбор местоположения проектируемого накопителя отходов требует тщательного гидрогеологического обоснования. Оно включает: 1) оценку условий природной защищенности подземных вод; 2) изучение взаимодействия загрязняющих веществ с породой и подземными водами; 3) прогноз миграции загрязняющих веществ по водоносному горизонту; 4) изменение качества воды на водоизборах; 5) прогноз разгрузки в реки и водоемы; 6) размещение наблюдательных скважин.

Особое значение приобретает учет условий природной защищенности подземных вод при выборе мест размещения отходов для предотвращения или уменьшения масштабов загрязнения подземных вод.

Нами разработана методика оценки защищенности подземных вод, которая широко используется для решения практических задач. На ее основе строятся карты районирования территории по условиям защищенности. Суть этой методики заключается в следующем [2, 3].

Под защищенностью подземных вод понимается перекрытость водоносного горизонта отложениями, прежде всего слабопроницаемыми, и гидродинамические условия, препятствующие проникновению загрязняющих веществ с поверхности земли в подземные воды. К слабопроницаемым относятся отложения (супеси, суглинки, глины и др.), коэффициент фильтрации которых меньше 0,1 м/сут.

Защищенность подземных вод зависит от многих факторов, которые можно разделить на три группы — природные, техногенные, физико-химические. К основным природным факторам относятся геолого-гидрогеологические условия.

К техногенным факторам относятся прежде всего условия нахождения загрязняющих веществ на поверхности земли и определяемый этими условиями характер проникновения в подземные воды. Для жидких отходов это проникновение происходит за счет фильтрации или совместного действия фильтрации и диффузии; в случае твердых отходов и при движении через глины — главным образом за счет диффузии.

К физико-химическим факторам относятся специфические свойства загрязняющих веществ, влияющие на их миграцию (сорбируемость, время распада).

Оценка защищенности грунтовых вод может быть качественной и количественной.

Качественная оценка основывается на природных факторах и выполняется при региональных исследованиях, количественная — на природных и техногенных факторах выполняется при детальных исследованиях на локальных участках.

Качественная оценка защищенности производится по сумме баллов, оценивающих глубину залегания уровня грунтовых вод, мощность слабопроницаемых отложений, их литологию и фильтрационные свойства. Чем больше сумма баллов, тем лучше условия защищенности.

Количественная оценка защищенности может быть выполнена по времени вертикальной фильтрации, которое находится расчетным путем. Этот показатель (время) зависит не только от природных факторов, но и от техногенных условий на поверхности. Чем больше время фильтрации, тем лучше условия защищенности.

На основе качественной и количественной оценок защищенности строятся карты, которые могут быть использованы для планирования размещения объектов, в том числе участков, занятых отходами, с учетом охраны подземных вод. Такие карты уже построены для отдельных территорий России и европейской ее части в целом. На основе количественной оценки защищенности могут быть построены карты защищенности от отдельных групп загрязняющих веществ, например от некоторых видов радиоактивных загрязнений, бактериальных загрязнений.

При размещении отходов обязательно должен быть дан прогноз возможного их влияния на водозаборы подземных вод. Этот прогноз включает оценку: 1) возможности захвата загрязненных вод (на участке размещения отходов) областью питания водозабора; 2) времени подтягивания загрязненных вод к водозаборному

сооружению; 3) изменения качества воды на водозаборном сооружении после начала подтягивания к нему первых порций загрязненных вод [2].

Особое место в удалении жидких промышленных отходов занимает их подземное захоронение в глубокие водоносные горизонты, осуществляемое посредством закачки стоков в скважины. Основные положения, выработанные в СССР в 70—80-х годах и относящиеся к удалению отходов по этому методу, следующие.

Прежде всего, подземное захоронение (ПЗ) промстоков — метод ограниченного применения. Он реализуется не повсеместно и не в широких масштабах, а лишь в определенных геолого-тектонических, гидрогеологических, сейсмических и геотехногенных условиях геологической среды; он применяется не по отношению к любым промстокам, а только к наиболее опасным и сильно загрязненным, не имеющим на сегодняшний день надежных и экономически эффективных способов очистки и обезвреживания.

Подземное захоронение может использоваться для удаления опасных стоков в течение всего срока работы предприятия, но более рациональным и экологически оправданным представляется этот метод в качестве временной меры (на срок 5—7 лет), пока еще не сооружены очистные сооружения для закачиваемых стоков. Именно такой подход был использован при подземном удалении сточных вод на Надеждинском горно-металлургическом заводе (Норильский район).

Далее, метод ПЗ предназначен для удаления небольших объемов промстоков. Это обусловлено прежде всего низкими фильтрационными свойствами водоносных пород глубоких горизонтов (глубина более 800—1000 м от поверхности земли). Отечественный и зарубежный опыт свидетельствует о том, что в большинстве случаев на одном полигоне закачка стоков составляет от $0,5 \div 0,7$ до $1 \div 1,5$ тыс. м³/сут и редко превышает $3 \div 4$ тыс. м³/сут. Конечно, в отдельных благоприятных геолого-гидрогеологических и геотехногенных условиях не исключается закачка и больших количеств стоков (например, при использовании стоков, если это позволяют их свойства, для заводнения нефтяных месторождений). Но это именно отдельные случаи, но никак не общее правило.

Имеются и другие обстоятельства, говорящие в пользу ограничения объемов закачиваемых стоков: это уменьшение размеров области растекания стоков в пласте, снижение риска загрязнения геотехногенных объектов, упрощение контроля за растеканием закачиваемых стоков. Следует отметить также, что закачка в отличие от откачки способствует разуплотнению пород и образованию трещин, что может стимулировать наведенную сейсмоактивность особенно в условиях «мозаичного» строения геологической среды и изменчивого («муарового») во времени поля напряжений [5].

Подземное захоронение сточных вод может быть осуществлено только в горизонты, не содержащие подземных вод, которые используются или могут быть использованы для водоснабжения, хозяйствственно-бытовых, бальнеологических и промышленных целей. Не допускается закачка сточных вод в горизонты пресных подземных вод.

Для предотвращения выхода закачиваемых стоков в вышележащие эксплуатируемые водоносные горизонты, особенно в горизонты питьевого водоснабжения, пласт-коллектор должен быть перекрыт не только надежным выдержаным по мощности и литологии водоупорным слоем, но и буферным водоносным горизонтом, залегающим над этим водоупором. Вопрос изолированности пласта-коллектора является важнейшим при обосновании возможности подземного захоронения стоков. Его изучению уделялось большое внимание при проведении разведочных работ на объектах подземного захоронения промстоков.

Анализ этих работ показал [4], что по результатам опытно-фильтрационных исследований (нагнетания в пласт-коллектор или откачки из него) практически невозможно установить взаимосвязь с вышележащим водоносным горизонтом (если только вблизи опытного куста не имеется сквозного литологического

«окна», прорезающего весь водоупор и соединяющего пласт-коллектор с верхним водоносным горизонтом).

При изменении мощности (m_0) сплошного водоупора от 10 до 150 м и пьезопроподности (a_0) водоупорных пород от 100 до 1 м²/сут время, за которое влияние гидродинамического возмущения через разделяющий водоупор достигнет верхнего водоносного горизонта, составит от десятков суток (при малых m_0 и больших a_0) до сотен суток (при больших m_0 и малых a_0). Кроме того, для того чтобы в верхнем водоносном горизонте сформировался измененный режим давлений, потребуется еще какое-то время (и немалое). Наконец, чтобы это изменение давления было достаточно заметным, нагнетания (или откачки) должны производиться с большим расходом.

Для глубоких горизонтов эти условия трудно выполнимы. Поэтому нельзя рассчитывать на то, что по результатам опытных фильтрационных работ можно будет установить в этих условиях взаимосвязь водоносных горизонтов. Постановка их для этих целей во многих случаях практически не дает ожидаемых результатов и не имеет смысла. Мы об этом писали раньше [4] и считаем необходимым подчеркнуть это важное положение еще раз.

Несцелесообразность опытных работ для выявления взаимосвязи пласта-коллектора с вышележащим водоносным горизонтом тем более очевидна, когда этот верхний горизонт является буферным. Если в этом случае и произойдет некоторая утечка стоков за счет перетекания, то они попадут в буферный горизонт, предназначенный для перехвата перетекающих стоков.

Возможность перетекания стоков или, вернее, предпосылки перетекания должны устанавливаться на основе анализа общих геолого-гидрогеологических и тектонических условий, литологического строения и сплошности водоупора, лабораторного определения проницаемости и пористости разреза водоупора по керновому материалу, соотношения уровней (давлений) в водоносных горизонтах, температурных замеров по разрезу водоупора и в смежных водоносных горизонтах. Особое значение приобретает изучение динамики уровней (давлений) в процессе длительной опытно-промышленной закачки стоков. Мы считаем, что проведение таких опытно-промышленных закачек является, с одной стороны, эксплуатационной разведкой условий подземного захоронения стоков, а с другой — реальной закачкой стоков в течение ограниченного, хотя и достаточно длительного периода времени, за который могут быть решены производственные вопросы очистки и обезвреживания закачиваемых стоков.

Таким образом, при обосновании закачки стоков необходимо учитывать следующие условия: пласт-коллектор не должен содержать пресных подземных вод, поскольку в такие горизонты исключается закачка стоков; в зоне влияния закачиваемых стоков не должно быть подземных вод бальнеологического и промышленного назначения, залежей нефти и газа, месторождений твердых полезных ископаемых; пласт-коллектор должен быть перекрыт надежным водоупором; над водоупором должен располагаться буферный водоносный горизонт, содержащий непригодные для использования минерализованные воды; не следует размещать полигоны закачки стоков в сложных по тектоническим условиям районах, вблизи зон разломов, в районах развития солянокупольной тектоники и диапировых структур, в сейсмических районах.

Важной составной частью гидрогеологического обоснования размещения опасных отходов является создание комплексной системы мониторинга для контроля за состоянием подземных вод и природной среды в зоне влияния на-копителя отходов. Это необходимо для своевременного выявления опасного уровня загрязнения подземных вод и принятия мер для его локализации. Такой мониторинг должен осуществляться и после прекращения функционирования полигона отходов, поскольку старые свалки отходов в течение длительного времени представляют опасность для подземных вод и других природных сред. В районе действующих и старых свалок отходов могут формироваться и сохранять-

ся химическая, газовая и температурная аномалии, оказывающие влияние на состояние почвенного слоя и растительности.

Оценка влияния отходов на подземные воды и окружающую природную среду, создание системы мониторинга должны быть составными частями проекта полигона отходов.

Загрязнение подземных вод влечет за собой важные экологические последствия. Прежде всего это ухудшение питьевых свойств подземных вод и условий водоснабжения. Наибольшую опасность представляет накопление нитратов, нефтепродуктов, ароматических углеводородов (прежде всего бенз(а)пирена), тяжелых металлов. Эти вещества являются биологически активными, они влияют на кроветворную систему и генетический механизм человека. Важнейшим следствием загрязнения подземных вод является уменьшение содержания кислорода в подземных водах, что снижает их самоочищающую способность.

С разгрузкой загрязненных подземных вод связано загрязнение морских вод в шельфовой прибрежной зоне. Прибрежная зона является санитарным кордоном, где загрязняющие вещества поверхностных и подземных вод перерабатываются и обезвреживаются вследствие химических и биологических процессов. Загрязнение прибрежной зоны снижает ее санитарные возможности и создает, с одной стороны, угрозу жизни морской фауны и флоре, с другой — может привести к непредсказуемому росту отдельных видов растительных и живых организмов.

Наконец, с загрязнением подземных вод связано образование техногенной газовой оболочки в зоне аэрации над их поверхностью, что может влиять на агрохимические свойства почв, продуктивность и качество сельскохозяйственных культур.

Гидрогеологические исследования на участках действующих и старых свалок отходов должны быть дополнены наблюдениями за загрязнением почв и снежного покрова, речных вод.

Целесообразна подготовка к периодическому изданию (один раз в 2—3 года) бюллетеня состояния подземных вод и природной среды на участках размещения отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Временный классификатор токсичных промышленных отходов и методические рекомендации по определению класса опасности промышленных отходов. М.: Типография Минздрава СССР. Гос. комитета СССР по науке и технике. 1987.
2. Гольдберг В. М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984. С. 262.
3. Гольдберг В. М. Природные и техногенные факторы защищенности грунтовых вод // Бюл. Моск. о-ва испыт. природы. Отд. геол. 1983. Т. 58. Вып. 2. С. 102—110.
4. Гольдберг В. М., Лукьянчикова Л. Г., Графский Б. В., Тарасова Н. В. Обобщение опыта разведочных работ по обоснованию подземного захоронения промышленных сточных вод // Инж. геология. 1986. № 1. С. 110—118.
5. Николаевский В. Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984. 231 с.

ИГЦ РАН

Поступила в редакцию
18.V.1994

УДК 624.131

© 1995 г. Л. П. ГРИБАНОВА

ПРОБЛЕМА ЗАХОРОНЕНИЯ И УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В МОСКОВСКОМ РЕГИОНЕ

Предложена методика оценки экологической опасности, исходящей от полигонов и свалок твердых бытовых отходов (ТБО). Проведена типизация существующих объектов по размерам и расположению свалок, объемам отходов и их составу. Выделены группы факторов, обеспечивающие: полную или частичную изоляцию компонентов природной среды и способность природной среды к самоочищению. Объекты складирования ТБО в Московской области классифицированы на три группы: потенциально опасные, средней опасности и относительно безопасные.

Неудовлетворительная хозяйственная деятельность последних десятилетий, размещение крупных народнохозяйственных объектов без надежного экологического обоснования отрицательно влияют на окружающую природную среду, здоровье людей, устойчивость и безопасную эксплуатацию сооружений.

По экспертным оценкам, помимо снижения экологического потенциала геологической среды прямой материальный ущерб от развития негативных процессов в литосфере достигает 16 млрд. руб. в год. Это связано прежде всего с ростом заболеваемости людей, снижением их работоспособности, с расточительством при использовании природных ресурсов.

В этой связи изучение состояния природной среды (почво-грунтов, подземных и поверхностных вод, горных пород), прогнозирование ее изменений под влиянием техногенных факторов и определение безопасных с точки зрения экологии техногенных нагрузок становится в ряд важнейших социально-экономических задач современной геологии.

В зарубежной и отечественной практике сложились два направления решения проблемы обезвреживания отходов: 1) вторичное использование отходов и внедрение передовых технологий; 2) захоронение отходов на контролируемых полигонах с последующей их консервацией и рекультивацией земель.

Решение проблемы по первому направлению позволяет сэкономить топливо, сырье, предотвратить отчуждение земельных территорий, но имеет ряд недостатков. Например, при эксплуатации мусоросжигательных заводов сложно исключить загрязнение атмосферы, так как процесс сжигания характеризуется высокой зольностью, а компостирование отходов с целью использования их в сельском хозяйстве осложнется вследствие высоких концентраций металлов и других токсичных веществ, раздельная же утилизация отходов затруднена из-за сложности их сепарации. Наиболее перспективным, видимо, является метод пиролиза, но он пока не находит в России широкого применения. В настоящее время в нашей стране функционируют заводы как по сжиганию, так и по переработке ТБО (мусоросжигательные — в Москве, Владивостоке, Владимире, Мурманске, Пятигорске, Сочи; мусороперерабатывающие — в Нижнем Новгороде и Санкт-Петербурге). Перспективной программой в Российской Федерации предусмотрено построить 43 завода по переработке отходов и 84 крупных полигона для их обезвреживания, 35 мусороперегрузочных станций. Получают развитие 49 производственно-технических баз предприятий, осуществляющих ме-

ханизированную уборку территорий. Выполнение программы позволит получить 1,9 млн. т компста, сэкономить 480 тыс. т условного топлива и возвращать для последующего использования 140 тыс. т металла ежегодно.

Опыт многих развитых капиталистических стран свидетельствует о том, что даже при высоком уровне технологических разработок и значительных инвестициях в данную область складирование отходов без переработки является либо преобладающим, либо одним из основных методов. Исходя из этого можно полагать, что в России еще долгое время проблема складирования отходов на полигоны будет весьма актуальной.

На территории Московской обл. расположена крупнейшая в России Московская агломерация, и в процессе ее развития все большее значение приобретает проблема обезвреживания твердых бытовых и промышленных отходов, особенно в связи с необходимостью охраны окружающей среды. В Московской обл. производится 20 млн. м³ твердых бытовых отходов в год (г. Москва — 13 млн. м³, область — 7 млн. м³).

Основным способом обезвреживания отходов в Московском регионе является складирование их на полигонах, параллельно планируется введение в строй заводов по переработке твердых бытовых отходов.

В Москве эксплуатируются два мусоросжигательных и один мусороперерабатывающий заводы, использующие импортное технологическое оборудование. Мусоросжигательные заводы из-за невозможности обеспечения экологических требований работают со сниженной производительностью. В области заводов нет.

На полигонах и свалках ТБО Московской области захоронено 120 тыс. т лома черных металлов, 20 тыс. т цветных, стекла, пластмассы, тонны макулатуры, 80 тыс. т пищевых отходов, и с каждым годом объем отходов растет.

Количество полигонов и свалок ТБО в Московском регионе площадью свыше 1 га более 200, мелкие же стихийные свалки практически не поддаются учету. Детальные и рекогносцировочные обследования этих объектов позволили сделать вывод о чрезвычайном разнообразии природно-технических систем полигон ТБО — природная среда. Выявлено, что некоторые объекты оказывают катастрофическое воздействие на природную среду, влияние же других — слабое и в ряде случаев ограничивается лишь эстетическим аспектом.

До последнего времени при организации свалок основную роль играли факторы, учитывающие сиюминутную экономию средств при эксплуатации, поэтому данные объекты расположены на неиспользуемых землях, в отработанных карьерах стройматериалов, вблизи населенных пунктов.

Игнорирование роли геоэкологических условий при выборе участков под свалки ТБО и пренебрежение природоохранными мероприятиями привели к тому, что многие свалки были организованы на участках с весьма неблагоприятными геолого-гидрологическими условиями, и данные объекты стали источниками интенсивного воздействия на природную среду, в том числе на человека.

В настоящее время коммунальные службы, экологические и геологические организации начали планомерные работы по изучению влияния существующих свалок ТБО на природную среду, оптимизации размещения новых полигонов, разработке экологически безопасных проектов. Круг организаций, которые участвуют в изучении свалок, постоянно расширяется за счет производственных геологических изыскательских организаций, не обладающих опытом работы на подобных объектах, поэтому назрела необходимость в разработке унифицированных методик по изучению свалок бытовых и промышленных отходов, организации и ведения на последних режимных экологических наблюдений.

На данный момент в «Геоцентре» и НПТ «НОЭС» накоплен большой фактический материал по геоэкологическому изучению полигонов и свалок ТБО: 1) проведено инженерно-геологическое районирование по выявлению благоприятных по геолого-гидрологическим условиям участков под складирование отходов для 16-ти районов Московской области. На выбранных

перспективных участках были проведены детальные изыскательские работы в объеме, необходимом для проектирования полигонов ТБО; 2) изучено влияние 50 существующих свалок ТБО на природную среду, даны рекомендации по оздоровлению экологической обстановки в районе этих объектов; 3) впервые в России проводятся режимные экологические наблюдения на 8 действующих полигонах ТБО Московского региона, полученные данные имеют большое практическое и методическое значение; 4) создан каталог полигонов и свалок твердых бытовых и промышленных отходов Московского региона, в котором дана подробная характеристика 150 объектов, оценена геолого-гидрогеологическая ситуация участков их расположения, даны рекомендации по дальнейшей либо эксплуатации, либо реконструкции и рекультивации объектов, разработаны мероприятия по оздоровлению экологической обстановки вокруг них.

На основании анализа имеющегося материала в Московском регионе было выявлено чрезвычайное разнообразие природно-технических систем полигонов ТБО — природная среда при ряде общих черт. Предложена методика оценки экологической опасности существующих полигонов и свалок твердых бытовых и промышленных отходов. Первым этапом исследований является типизация существующих полигонов и свалок ТБО Московской области по следующим параметрам: размер объекта и объем складируемых отходов; состав отходов; расположение объектов (карьер, в виде насыпи).

По размерам свалок и объемам складируемых отходов выделено 4 класса. К первому классу относятся крупные и уникальные полигоны, принимающие отходы г. Москвы. Площадь таких полигонов варьирует от 10 до 63 га. Мощность толщи отходов изменяется от первых метров до 20 м и более. Объем отходов достигает несколько миллионов метров в кубе. Крупных полигонов в регионе не более 10 (Тимохово, Щербинка, Икша, Хметьево, Саларьево, Кучино и т. д.).

Второй класс составляют средние по размерам полигоны площадью от 2 до 10 га, мощность отходов до 10 м и более. Объем отходов — несколько сотен тысяч кубометров (максимум до миллиона кубометров). Таких объектов в регионе около 20 (Слизнево, Кулаково, Новомосковский и т. д.).

Третий класс включает малые свалки, образованные отходами мелких населенных пунктов. Площадь их колеблется от 0,2 до 2 га, мощность отходов не превышает первые метры, объем — не более нескольких десятков тысяч метров в кубе. Количество таких свалок не менее 100.

К четвертому классу, выделяемому по размерам, можно отнести стихийные свалки около деревень, дачных участков, отдельных предприятий. Площадь подобных свалок — десятки, редко сотни метров в квадрате, мощность не более 1 м. В связи с тем, что нагрузка на природную среду, оказываемая такими свалками, ничтожна мала по сравнению с объектами, рассмотренными выше. Количество их весьма велико и с трудом поддается учету.

Состав отходов, вывозимых коммунальными службами на свалки Московской обл., варьирует: складируются отдельно бытовые отходы, совместно бытовые и промышленные, отдельно промышленные. Как правило, токсичные и радиоактивные отходы захораниваются на специальных полигонах-могильниках. Часто определить состав отходов и отнести полигон к какому-либо типу можно лишь после детальных исследований.

По условиям эксплуатации выделяют: 1) полигоны и свалки ТБО, расположенные в карьерах либо прочих выемках; 2) полигоны и свалки ТБО в виде насыпей; 3) синтетическая группа: полигоны и свалки ТБО в виде насыпей, перекрывающих карьеры. При организации полигонов в сходных условиях объект, находящийся в выемке, всегда окажет более значительное воздействие на грунтовые воды вследствие близкого залегания отходов.

На полигонах, расположенных в карьерах, особенно в начальной стадии эксплуатации весьма сложно производить уплотнение отходов, поэтому происходит свободное аэрирование мусора и как следствие их возгорание.

Полигоны же, расположенные на поверхности земли, будут в общем случае

оказывать более значительное воздействие на окружающие грунты, почвы, растительность, поверхностные воды вследствие растекания фильтрата.

В итоге проведенной классификации каждый объект получает свою характеристику, в какой-то мере определяющей нагрузку на природную среду.

Следующим этапом исследований является типизация геолого-гидрогеологических условий по их устойчивости и воздействий полигонов ТБО. К критериям устойчивости относят: 1) строение и мощность зоны аэрации; 2) наличие регионального и местного водоупоров, характер, мощность их распространения; 3) наличие избыточного напора вод в питьевых водоносных горизонтах карбона; 4) наличие водоносных горизонтов мезокайнозойского возраста, залегающих выше горизонтов карбона. Все возможные критерии устойчивости подразделяют на две группы. В первую группу выделены факторы, обеспечивающие полную или частичную изоляцию компонентов природной среды от эмиссий или полей, вызванных действием полигона, т. е. ограничивающие природно-техническую систему в ядро.

Во вторую группу включены факторы, обеспечивающие способность природной среды к самоочищению — «буферность». В данном случае ПТС рассматривается как открытая система с изменяющимися размерами, в которой происходит вынос и перераспределение вещества и энергии. Критерием эффективности факторов устойчивости этой группы являются нормативные показатели (ГОСТы, ПДК), а также разброс фоновых значений состава и состояния различных компонентов природной среды.

Очевидно, что в природе не существует четкой границы между этими двумя группами факторов.

К группе факторов изоляции относят наличие, либо отсутствие слоев водоупорных грунтов в зоне аэрации или ниже по разрезу. Наличие таких грунтов обеспечивает резкое снижение (до прекращения) инфильтрации загрязненных вод с полигона. При данном подходе пренебрегают мощностью водоупорных слоев, так как определяющими являются фильтрационные свойства грунтов (низкая проницаемость, теоретически позволяющая снизить распространение загрязненных вод до ничтожных величин). Наличие избыточного напора подземных вод также значительно понижает риск проникновения фильтрата в водоносные горизонты вследствие изменения тренда перетекания.

К группе факторов, характеризующих способность природной среды к самоочищению (постепенному распределению загрязнения), относят такие показатели, как мощность зоны аэрации и относительных водоупоров, минеральный и литологический состав грунтов, гидрогеологические показатели, характеризующие пропорции смешивающихся загрязненных и природных вод (модуль подземного стока, мощность водоносного горизонта), и т. д. Механизмами разубоживания фильтрата являются различные виды адсорбции (механическая, биохимическая, хемосорбция и др.), биохимические и химические процессы трансформации соединений, а также разбавление, дисперсия, диффузия.

По отношению к распространению фильтрата по поверхности критерием изолированности будет служить отсутствие потоков загрязненных поверхностных вод, вытекающих с поверхности полигона (т. е. замкнутость полигона в гидрографическом аспекте — факторы рельефа и гидрографии). Факторами самоочищения будет являться разбавление (происходящее в поверхностных водотоках) и наличие гидрогеохимических барьеров [1].

Относительно распространения газа определяющими следует считать факторы, самоочищения (т. е. выделение в атмосферу и рассредоточение в ней, а также деструкции компонентов газа вследствие химических процессов), так как изолировать среду от газа, выделяющегося в отличие от фильтрата при любых условиях, не представляется возможным. Аналогично следует рассматривать выделение тепла.

Загрязнение (химическое, тепловое, радиоактивное и т. д.) — это превышение естественных для различных элементов природной среды концентраций веществ

и значений полей. Благоприятным является постепенное безопасное рассредоточение эмиссий, а не неопределено длительное депонирование потенциально вредных веществ. В современной ситуации невозможно четко идентифицировать реакции природной среды, экосистем, отдельных организмов и человека, соответственно разделив их на опасные и индифферентные.

Наиболее важным в данном случае является то, какие элементы в первую очередь подлежат защите. Решение этого вопроса предполагает выделение группы факторов социальных приоритетов.

В случае загрязнения подземных вод к этим факторам следует причислить наличие водозаборов и изолированность эксплуатируемых водоносных горизонтов, распространение «буферных», не используемых в качестве источников водоснабжения горизонтов, перекрывающих эксплуатируемые.

Наихудшим вариантом для размещения полигонов ТБО (в аспекте загрязнения подземных вод) является отсутствие региональных и местных водоупорных слоев и наличие в зоне аэрации преимущественно песчаных грунтов.

При выборе участков под новые полигоны ТБО не удается все их разместить на благоприятных площадях. Вследствие этого необходимо на основании имеющегося опыта оценить реальную опасность размещения полигонов в различных геолого-гидрогеологических условиях. Имеющаяся априорная база позволяет сделать вывод о том, что наличие моренных отложений мощностью в 5—7 м в большинстве случаев является достаточным условием для обеспечения защиты грунтового водоносного горизонта от воздействия малых и средних полигонов, принимающих нетоксичные отходы [2]. Мелкие полигоны не загрязняют грунтовые воды выше ПДК, причем эффективное очищение и разбавление фильтрата может происходить и без глинистых грунтов в зоне аэрации. Небольшая нагрузка на природную среду позволяет для оценки условий размещения малых и средних по объему полигонов ТБО рассматривать концепцию рассредоточения фильтрата.

При складировании весьма больших объемов отходов сорбционные свойства ледниковых отложений могут оказаться недостаточными для обеспечения защиты водоносных горизонтов. При захоронении обычных бытовых и нетоксичных промышленных отходов данный процесс фактически не представляет опасности вследствие интенсивного разубоживания загрязнителей. Однако при совместном захоронении бытовых и радиоактивных токсичных отходов следует оценивать возможность складирования только с учетом депонирования выделяющегося фильтрата. В данном случае благоприятными условиями являются лишь области распространения глинистых отложений регионального подоупора.

Исходя из ранее сказанного, все изученные полигоны и свалки твердых бытовых и промышленных отходов Московского региона нами расклассифицированы на три группы по степени экологической опасности (учитывались характеристика самого объекта и степень устойчивости среды в районе его расположения): потенциально опасные, средней опасности, относительно безопасные.

Из изученных нами 150 объектов Московского региона 26 являются потенциально опасными, представляющими серьезную экологическую угрозу для природной среды, в том числе для человека («Курбатово» в Серебряно-Прудском районе, «Гжельский» в Раменском, «Слизнево» в Наро-Фоминском, «Кулаково» в Чеховском, «Троицкий» в Подольском и др.). В связи с этим данные объекты подлежат первостепенному экологическому изучению, разработке проектов на их закрытие и рекультивации со срочной локализацией их негативного воздействия на природную среду.

Таким образом, пользуясь предложенной методикой оценки экологической опасности существующих свалок ТБО, можно провести аналогичные работы для любого региона и выявить экологически опасные свалки для принятия мер по локализации их негативного воздействия на природную среду и человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Грибанова Л. П., Зайцев А. С. Оценка геохимических изменений геологической среды на полигонах бытовых и промышленных отходов//Инж. геология. 1990. № 3. С. 78—84.
- Грибанова Л. П., Портнова Т. Г. Контроль подземных и поверхностных вод в районах полигонов твердых бытовых отходов Московского региона//Экологический вестник Подмосковья. 1993. № 4. С. 27—29.

«Геоцентр — Москва»

Поступила в редакцию
14.X.1994

УДК 624.131

© 1995 г. Р. С. ВИЛЛЕВАЛЬД

УПРАВЛЕНИЕ И НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ ПРОМЫШЛЕННЫМИ И БЫТОВЫМИ ОТХОДАМИ

Проблема утилизации и хранения твердых промышленных и бытовых отходов в Российской Федерации находится в критическом состоянии. Ежегодно в стране вырабатывается более 75 млн. т опасных промышленных и более 30 млн. т твердых бытовых отходов. Региональные природоохранные органы повлиять на улучшение положения с обезвреживанием отходов пока не могут, в частности, из-за отсутствия эффективного нормативно-правового регулирования обращения с отходами. В структуре Минприроды России создано Управление охраны окружающей среды от отходов производства и потребления, призванное проводить единую научно-техническую политику в вопросах обращения с отходами, включая учет образования, сбор, хранение, транспортировку, переработку, обезвреживание и захоронение отходов. Разрабатываются федеральные законы и нормативно-методические документы по обращению с отходами. Выполнение этих задач должно осуществляться специально подготовленными работниками.

Положение с отходами производства и потребления в нашей стране становится критическим, угрожая необратимыми процессами деградации природной среды и потери здоровья населения. Немногочисленные постановления руководящих органов страны по проблемам утилизации и хранения отходов с начала 70-х годов до настоящего времени не выполняются. Как население, так и многие органы надзора на местах («Санэпиднадзор», «Госкортехнадзор» и др.) сущностью проблемы не владеют. Региональные природоохранные органы повлиять на улучшение положения с отходами пока не могут.

Вместе с тем, согласно данным первой наиболее полной инвентаризации отходов промышленности, законченной в 1990 г., в Российской Федерации каждый год образуются более 75 млн. т опасных промышленных отходов (из общего ежегодного количества 4,5 млрд. т отходов).

Наибольшее количество отходов (около 80%), содержащих соли тяжелых металлов (свинца, никеля, кадмия), соединения мышьяка и шестивалентного хрома, образуется на металлургических и агрохимических предприятиях. В структуре наиболее опасных промышленных отходов, источником образования которых являются предприятия тяжелого и сельскохозяйственного машиностроения, отраслей химической, нефтехимической, металлургической промышленности, значительное место занимают нефтеотходы (более 600 тыс. т), а также отходы (более 190 тыс. т), содержащие такие высокотоксичные вещества, как бенз(а)пирен, хлорированные и неклорированные кремнийорганические мономеры, фенольные соединения.

К настоящему времени наличие токсичных отходов в хранилищах, занимающих в общей сложности площадь свыше 11 тыс. га, достигает 1,6 млрд. т.

Из общего объема образующихся отходов лишь 18% утилизируется и обезвреживается, свыше 65% направляется в специальные хранилища, принадлежащие обследованным предприятиям, а также в места неорганизованного складирования и на свалки бытовых отходов.

При этом в места организованного складирования направляется часто незначительная доля токсичных отходов. Так, предприятия тяжелого (образуют в год ~1 млн. т токсичных отходов) и сельскохозяйственного (2,4 млн. т) машиностроения организованно складируют менее 1/3 их объемов, химические и нефтехимические предприятия, вырабатывающие 3,9 млн. т — 20%, а станкостроительные (1,2 млн. т) — не более 16% токсичных отходов.

Положение с твердыми бытовыми отходами (ТБО) населенных пунктов страны характеризуется следующими цифрами. Всего вывозится жилищно-коммунальными службами примерно 30 тыс. т ТБО. Лишь 3% ТБО перерабатывается промышленными методами на 7 мусоросжигательных (с выработкой тепловой энергии) и 2 мусороперерабатывающих (с выработкой компоста) заводах. 97% ТБО вывозится на загородные территории (примерно 4000 свалок), занимающие постоянно не менее 10 000 га земли. Места захоронения ТБО, как правило, не обустроены, как того требуют действующие нормативные документы, и являются источниками интенсивного загрязнения почвы, воздуха, поверхностных и грунтовых вод. Большинство из них осуществляет прием на захоронение также токсичных промышленных отходов из-за отсутствия специальных объектов по обезвреживанию последних.

В последнее время тяжелое положение с утилизацией отходов усугубилось массовым нерегулируемым ввозом в страну токсичных отходов из развитых стран. Базельскую конвенцию по контролю за трансграничными перевозками опасных отходов и их удалением, которая в основном регулирует экспортно-импортные операции с ними, уже ратифицированную более 50 странами, наша страна ратифицировать была не в состоянии из-за отсутствия финансовых средств, необходимых для выполнения требований этой конвенции.

В развитых европейских странах, США и Японии пришли к пониманию того, что без активной «борьбы с отходами» невозможно добиться надлежащей чистоты воздуха, почв и воды. Борьба с отходами означает внедрение как новых малоотходных производственных технологий, так и эффективных, экологически чистых методов использования, обезвреживания и захоронения отходов. Характерно, что США и Япония с большой эффективностью используют западноевропейские технологии и их опыт. Значительно отставая в начале 80-х годов от Западной Европы в области термической переработки отходов, США за последнее десятилетие построили около 100 заводов по европейскому типу (с использованием отходов в качестве топлива для получения тепловой или электрической энергии). Планируя построить еще несколько десятков заводов, США к 2000 г. собираются 25% своих отходов обезвреживать промышленными методами (Япония, Швейцария и Дания уже сейчас сжигают более 70% образующихся в этих странах отходов).

В каждой из развитых индустриальных стран действуют законы, постановления, директивы или указания, отражающие вопросы образования, сбора, транспортировки, использования, обезвреживания и захоронения отходов. Для управления работой с отходами там созданы специальные подразделения в составе как федеральных, так и региональных органов по охране окружающей среды. В задачи таких органов входят: статистический учет образования отходов, малоотходных технологий, методов и мест обезвреживания, использования и захоронения отходов; создание и совершенствование систем управления обращением с отходами; регулирование экспортно-импортных операций с отходами; подготовка новых и корректировка действующих нормативно-правовых документов; организация производства оборудования и измерительной техники для строящихся заводов; контроль действующих и проектируемых объектов по переработке, обезвреживанию и захоронению отходов.

Выполнение этих задач осуществляется за рубежом специально подготовленными работниками. Они не могут и не должны выполняться специалистами по охране почв, воздуха или воды (как это пока чаще всего делается у нас).

Неквалифицированный подход к решению проблем обращения с отходами

приводит к нежелательным результатам. В последнее время работники ряда отраслей, в которых существенно сократился объем основных работ (например, черная и цветная металлургия и др.), решили попробовать свои силы в области обращения с отходами, не владея в достаточной мере особенностями проблемы. В результате создаются сложные, дорогие, трудоемкие технологии (сжигание в шлаковом расплаве, с помощью плазменных установок и др.), которые в условиях недостатка средств на местах не смогут быть реализованы и только задержат внедрение традиционных, отработанных в России и за рубежом технологий.

Регулирование обращения с отходами на федеральном уровне призвано осуществлять Управление охраны окружающей среды от отходов производства и потребления, созданное при Минприроды России. Это Управление должно проводить единую научно-техническую политику в вопросах обращения с отходами, включая учет образования, сбор, хранение, транспортировку, переработку, обезвреживание и захоронение их.

В задачи Управления также входят: организация разработки новых и совершенствование действующих нормативно-правовых актов по обращению с отходами и контролю за их выполнением; участие в разработке федеральных и крупных региональных программ по отходам, координация и нормативно-правовое обеспечение деятельности территориальных природоохранных органов; координация деятельности природоохранных подразделений других министерств и ведомств, предприятий и организаций; подготовка условий для ратификации Базельской конвенции; работа в международных организациях и с зарубежными фирмами по реализации проектов в области обращения с отходами.

Для реализации этих задач необходимо изучать, обобщать и распространять передовой отечественный и зарубежный опыт работы с отходами, организовывать проведение статоотчетности, мониторинга, НИИОКР в данной области, содействовать внедрению прогрессивных технологий как в производство, так и в процессы обезвреживания, переработки и захоронения отходов. К функциям вышеназванного Управления относится также взаимодействие со средствами массовой информации, общественными организациями и движениями, занимающимися этими проблемами, а также обучение и повышение квалификации кадровых работников в данной области.

В нормативно-правовом регулировании обращения с отходами положение складывается следующим образом. Существуют правовые документы, касающиеся данной проблемы: Закон РСФСР о санитарно-эпидемиологическом благополучии населения, Земельный кодекс РСФСР, Закон РФ о недрах и об охране окружающей природной среды.

Из наиболее важных подзаконных актов и нормативно-методических документов необходимо отметить следующие.

Постановлением Совмина СССР от 03.05.84 г. № 394 «Об утилизации, обезвреживании и захоронении токсичных промышленных отходов» предусматривалось возложить ответственность за удаление отходов на их производителей. Предлагалось: в проектно-сметной документации на строительство предприятий максимально использовать малоотходные технологические процессы производства, обеспечивающие «комплексное использование природных ресурсов и утилизацию токсичных промышленных отходов»; при разработке схем и проектов районной планировки предусматривать строительство полигонов по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов.

На основании Постановления № 394 были разработаны следующие важные нормативные документы, утвержденные Минздравом РФ: 1) Предельное количество накопления токсичных промышленных отходов на территории предприятия (организации), 1985 г.; 2) Предельное содержание токсичных соединений в промышленных отходах в накопителях, расположенных вне территории предприятия (организации), 1985 г.; 3) Предельное содержание токсичных соединений в промышленных отходах, обуславливающее отнесение этих отходов к категории по токсичности, 1984 г.; 4) Предельное количество токсичных промышленных отхо-

дов, допускаемое для складирования в накопителях твердых бытовых отходов, 1985 г.; 5) СНиП 2.01.28—85. Полигоны по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. Основные положения по проектированию.

Из других нормативных документов следует отметить ГОСТ 17.0.0.04—90 «Экологический паспорт промышленного предприятия». Основные положения: Порядок накопления, транспортировки, обезвреживания и захоронения токсичных промышленных отходов (санитарные правила), 1985 г.; Временный классификатор токсичных промышленных отходов и методические рекомендации по определению класса токсичности промышленных отходов, 1987; Инструкция по проектированию и эксплуатации полигонов для твердых бытовых отходов, 1983 г.; Рекомендации по проектированию и эксплуатации заводов по сжиганию ТБО, 1987; Рекомендации по проектированию и эксплуатации заводов по переработке ТБО в компост, 1986 г.; Правила разработки схем санитарной очистки городов РСФСР, 1986 г. и др.

Три закона находятся в стадии разработки и согласования: Закон о санитарной очистке населенных пунктов от твердых бытовых отходов, Закон об опасных отходах, Закон об отходах производства и потребления. С принятием этих законов и подзаконных актов в развитие их будет создана нормативно-правовая база для осуществления мероприятий, заложенных в целевой федеральной программе «Отходы», разработанной Минприроды России.

Государственное предприятие
«Экотехпром»

Поступила в редакцию
18.V.1994

УДК 551.345

© 1995 г. А. В. БРУШКОВ

ДИНАМИКА ВЛАГИ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОСТОЯННОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА

Проанализировано современное состояние вопроса о передвижении влаги в мерзлых грунтах под действием температурного градиента. Описаны эксперименты автора в условиях подземной лаборатории с образцами, которые выдерживались в течение 5 лет при постоянном температурном градиенте $\sim 0,05$ град С/см. Суммарная влажность в образцах не меняется, но наблюдаются некоторые изменения в криогенном строении.

Ввиду практического значения влияния льдистости (влажности) на механические свойства мерзлых пород, подверженных колебаниям температуры, вопросу о передвижении влаги в мерзлых породах под влиянием температурного градиента всегда придавали важное значение. Однако экспериментальные трудности его исследования до сих пор сдерживают попытки установить важнейшие закономерности этого процесса.

Для немерзлых пород он был подвергнут глубокому анализу А. Ф. Лебедевым (1918 и последующие годы) [7]. А. Т. Морозовым [2], Буйюкосом [9] и другими было установлено, что с повышением влажности перенос влаги под влиянием градиента температуры сначала растет до некоторой величины (причем преобладает пароперенос), а затем уменьшается вплоть до полного прекращения. Наиболее логичное объяснение явлению переноса, сохраняющее значение до сих пор, дал Буйюкос еще в 1915 г.: «С повышением температуры уменьшаются силы адгезии и аттракции, существующие между твердыми частицами и влагой, в силу чего холодная почва перетягивает к себе часть влаги с теплого конца колонны до тех пор, пока не установится равновесие. Чем выше температура теплого конца, тем больше передвигается влага. После того как достигается максимум в передвижении влаги, притягательная сила холодного конца вследствие возрастания влажности начинает увеличиваться медленнее, чем уменьшаются адгезия и аттракция в теплом конце, вплоть до того, что холодный конец вообще перестает перетягивать к себе влагу» [9].

Для мерзлых пород возможна, по мнению А. М. Глобуса [2], активизация переноса, несмотря на их льдонасыщение. При этом он считает, что пародиффузийный поток мал из-за низких температур и занятости пор влагой, термокапиллярный — то же из-за сокращения поверхности раздела вода — воздух и уменьшения менисковых сил, а главное значение имеет третий фактор — уменьшение потенциала влаги при ее кристаллизации в процессе превращения в лед. Однако по справедливому замечанию А. А. Роде [8], природа обеих сил не вполне ясна. И. А. Тютюнов и З. А. Нерсесова [5] видят их источник в поверхностной энергии твердых частиц почвы, которая освобождается при дегидратации этих частиц в процессе образования льда. По Б. В. Дерягину [4], явление термоосмоса связано с отличием удельной энталпии жидкости в граничных слоях от объемных значений, причем знак разности может быть различен в зависимости от состава компонент, размера слоев и т. д., т. е. поток жидкости может быть направлен и в горячую, и в холодную сторону. По словам Б. В. Дерягина, экспериментальные результаты термоосмотического течения в

относительно широкопористых телах довольно противоречивы. Так, в пористых стеклах со средним радиусом пор ~ 1 мкм и в стеклянных капиллярах радиусом 10—15 мкм термоосмотическое течение направлено в холодную сторону, свидетельствуя о повышенной энталпии граничных слоев воды. В смачивающих пленках воды на поверхности стекла, напротив, наблюдался перенос воды в горячую сторону (данные А. П. Ершова и Н. В. Чураева [4] и др.).

Экспериментально хорошо изучен и многократно описан процесс миграции влаги к фронту промерзания в промерзающих породах (естественно, формирующийся в условиях температурного градиента). Его связывают с различными причинами, но в последнее время благодаря значительным успехам экспериментальных исследований кафедры геокриологии МГУ им. М. В. Ломоносова получила распространение точка зрения Э. Д. Ершова, которая объясняет его высвобождением поверхностной энергии грунтовых частиц при переходе части воды, в том числе связанной воды, в лед. Им и его сотрудниками [6] убедительно показано также, что течение незамерзшей воды продолжается и в промерзающей зоне, т. е. в мерзлом грунте.

Б. В. Дерягин считает [4], что, хотя сам факт такого течения в мерзлом грунте установлен достоверно работами А. А. Ананяна [1], Л. В. Чистотинова [4], А. Р. Юмикиса [10], Э. Д. Ершова [5] и др., физические закономерности и механизм переноса обусловлены установленным им эффектом термокристаллизационного течения. Б. В. Дерягин рассматривает систему, где ледяная пластина находится между двумя твердыми поверхностями, отделенными от нее пленками незамерзшей воды. Если такую систему вывести из состояния равновесия, создавая малую разность температуры ΔT или давления ΔP , начнется тепло- и массообмен между прослойками, сопровождающийся плавлением льда на одной его поверхности и кристаллизацией воды на другой. Тогда производство энтропии S для рассматриваемой системы в единицу времени t и на единицу площади пластиинки льда:

$$\frac{dS}{dt} = q_s \frac{\Delta P}{T} + W \frac{\Delta T}{T^2},$$

где q_s — поток массы; W — поток тепла; T — температура.

Используя методы термодинамики необратимых процессов, для потока массы q_s можно получить следующее выражение:

$$q_s = a_{11} [\Delta P + \rho_s L (\Delta T / T)],$$

где a_{11} — коэффициент сопротивления коммуникаций; ρ_s — плотность; L — тепло фазовых переходов.

В работах С. Е. Гречищева [3] на основе уравнений Гиббса-Дюгема для фаз и рассмотрения кинетики в области фазовых переходов было получено следующее выражение:

$$v_n d(cq_w) = -LdT/T - v_n d\sigma^{ck} - (v_l - v_n) dP,$$

где v_n и v_l — удельные объемы соответственно пленки воды и льда; q_w — поток влаги; c — коэффициент; σ^{ck} и P — давление соответственно во льду и в водяной пленке. Не трудно видеть общее сходство выражений С. Е. Гречищева и Б. В. Дерягина, несмотря на разные методы их получения, а также их близость к известной формуле Н. С. Акулова (1946) для скорости фазового перехода. Нельзя не согласиться с их общим подходом, поскольку энергетическая миграция влаги при промерзании и в мерзлых грунтах, вероятно, должна быть обусловлена фазовым переходом и зависеть, следовательно, от теплоты фазового перехода. Таким образом, в этих моделях миграции влаги вызвана энергетическими потребностями растущего кристалла льда.

Естественно, что здесь не учитываются силы связи влаги с грунтовыми частицами, их состав, структура пор, характер поверхности и другие факторы,

Таблица 1

Гранулометрический состав и пластичность исследованного суглинка

Содержание частиц (%) при размере частиц, мм									Пластичность, д. е.		
2—1	1—0,5	0,5—0,25	0,25—0,1	0,1—0,05	0,05—0,01	0,01—0,002	<0,002		W_L	W_p	I_p
0,3	0,5	1,9	4,8	70,2	12,6	2,8	6,0	0,37	0,28	0,09	

Примечание: W_L , W_p — влажности верхнего и нижнего пределов пластичности; I_p — число пластичности.

Таблица 2

Температуры начала замерзания $\theta_{\text{нз}}$ и оттаивания $\theta_{\text{но}}$ в зависимости от влажности образцов в повторных опытах (данные Ю. С. Петрухина)

Засоленность $D_{\text{sol}} = 0,0\%$				Засоленность $D_{\text{sol}} = 0,5\%$ (морская соль)				
W , д. е.	$\theta_{\text{нз}}, ^\circ\text{C}$			W , д. е.	$\theta_{\text{нз}}, ^\circ\text{C}$			$\theta_{\text{но}}, ^\circ\text{C}$
0,442	-0,15	-0,2	-0,2	0,373	-1,0	-1,2	-0,3	-0,6
0,373	-0,1	0	-0,1	0,244	-1,9	-1,9	-1,0	-1,4
0,263	-0,6	-0,3	-0,2	0,196	-2,6	-2,7	-0,8	-0,8
0,174	-2,5	-1,6	-1,4	0,180	-3,1	-3,3	-1,6	1,5
0,156	-5,9	—	—	0,149	-4,5	-4,8	-1,7	-1,8

которые в мерзлых породах могут иметь существенное значение. Поэтому, в частности, Э. Д. Ершов [6] связывает температурные градиенты с возникновением градиента потенциала влаги по жидкой ($\text{grad } \mu_w$) и парообразной ($\text{grad } \mu_p$) фазам, что вызывает направленную диффузию молекул незамерзшей воды и пара. При этом важно, что в случае полного влагонасыщения мерзлого образца происходит не свободное (в пустых порах), а избыточное (когда все поры заполнены льдом) сегрегационное льдовыделение, определяемое не только теплофизическими, но и физико-механическим условием, которое определяет необходимость преодоления сцепления мерзлого грунта и создания дополнительного пространства для мигрирующей воды. Как и в талых грунтах, в условиях «закрытой» системы (без подложки льда у высокотемпературной части образца) льдонакопление происходит за счет лишь собственных запасов влаги (порового льда) мерзлого грунта и носит в целом затухающий характер.

Таким образом, основные факты и представления о переносе влаги в настоящее время имеются, и главной задачей является определение границ существования и количественных характеристик этого процесса в мерзлых породах под влиянием температурных градиентов.

Речь идет по существу об устойчивости криогенных мерзлых толщ и оснований сооружений, подвергающихся воздействию больших и малых температурных градиентов, и об оценке этой устойчивости для практических целей.

Эксперименты Э. Д. Ершова и его сотрудников [6] и другие экспериментальные работы показали, что при воздействии больших ($0,6$ — $3,0^\circ\text{C}/\text{см}$) градиентов температур перераспределение влаги происходит, однако задача прогноза требует оценки миграции в условиях малых температурных градиентов и большого времени воздействия. Из-за очевидных технических трудностей такие работы до сих пор не проводились.

В своих экспериментах мы руководствовались необходимостью выбора

Таблица 3

Распределение влажности и засоленности по длине контрольных образцов после промораживания (опробование проведено через каждые 2 см)

Номер образца			
1	2	3	
Влажность W , д. е.			D_{sol} %
0,382	0,440	0,419	0,47
0,330	0,337	0,399	0,45
0,394	0,427	0,395	0,43
0,398	0,443	0,388	0,43
0,416	0,450	0,389	0,45

Таблица 4

Распределение влажности и засоленности в образцах после 6 месяцев воздействия температурного градиента (опробование проведено через 1,25 см)

T , °C	Номер образца		
	1	2	3
Влажность, д. е.			D_{sol} %
-2,2	0,394	0,436	0,403
	0,404	0,424	0,395
	0,412	0,409	0,395
	0,401	0,411	0,391
	0,402	0,402	0,386
	0,401	0,407	0,388
	0,395	0,405	0,393
-2,7	0,396	0,410	0,394

минимально возможного, но технически надежно обеспеченного поддержания температурного градиента в мерзлых грунтах в течение длительного времени. При положительных результатах экспериментов это позволило бы сделать обобщающие выводы для состояния мерзлых грунтов в многолетнемерзлых толщах и в основаниях инженерных сооружений.

В этих экспериментах были использованы возможности подземной лаборатории Амдерминской мерзлотной станции, находящейся на глубине нулевых годовых амплитуд колебаний температуры. Подземная лаборатория разделена теплоизоляционными стенками на отсеки, где с помощью греющего кабеля температура поддерживается постоянной многие месяцы и годы. Колебания температуры в течение 3—5 лет не превышают $0,4^\circ\text{C}$ и происходят согласованно во всей лаборатории. В одной из стенок из пенополистирола толщиной 10 см были проделаны цилиндрические отверстия, куда вставили специальные контейнеры с образцами. Температура на «холодной» стенке составляла в среднем $-2,7^\circ\text{C}$, на «теплой» $-2,2^\circ\text{C}$, температурный градиент в грунте (постоянный по длине) составлял, таким образом, в среднем $0,05^\circ\text{C}/\text{см}$. В экспериментах был использован суглинок, который отбирался из морских плейстоценовых отложений вблизи пос. Амдерма. Некоторые его свойства приведены в табл. 1.



Рис. 1. Криогенное строение контрольных образцов суглинка до начала эксперимента по миграции влаги ($W = 44\%$)

Рис. 2. Начальное (*а*) и конечное (*б*) распределение влажности в образцах при начальной влажности 40% (I), 44% (II) (незасоленных) и $W = 40\%$, $D_{sol} = 0,5\%$ (III)

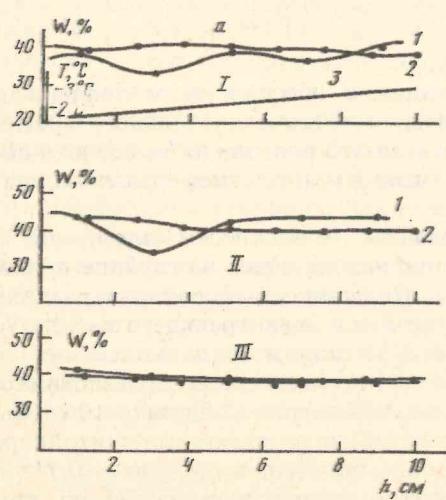


Рис. 2

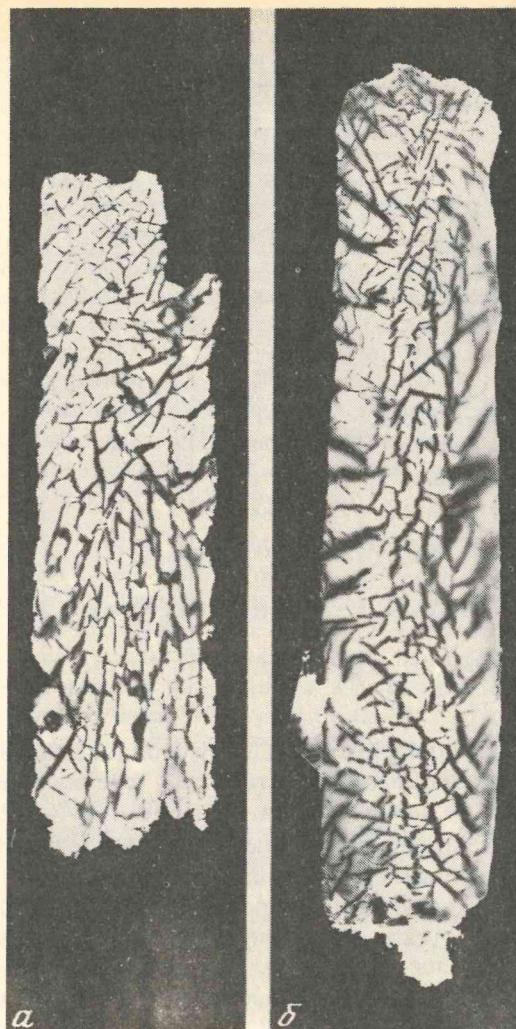


Рис. 3. Криогенное строение образцов суглинка с $W = 0,44\%$ после 6 мес (*а*) и 5 лет (*б*) эксперимента (вверху в среднем — $-2,7^\circ\text{C}$, внизу — $-2,2^\circ\text{C}$)

Зависимость содержания незамерзшей воды в суглинке при отрицательных температурах может быть представлена в виде температур начала замерзания (оттаивания) при различной влажности (данные Ю. С. Петрухина, полученные им на Амдерминской станции) (табл. 2).

При подготовке к эксперименту незасоленный грунт был высушен, измельчен в ступке и замешан одновременно в трех емкостях — либо с дистиллированной водой до влажности ~ 44 и 40% , либо с раствором морской соли (выпаренной из морской воды Карского моря) до влажности $\sim 40\%$. Приготовленную грунтовую пасту выдерживали для равномерного распределения влаги по объему в течение 3 сут в закрытой посуде, а затем помещали в специальные контейнеры из полиэтиленовой трубы диаметром ~ 2 см, толщиной стенок 1 мм и длиной 12 см. Трубы заваривали с обоих концов, закладывали в холодильник в горизонтальном положении и выдерживали при температуре -9 — 11°C в холодильной камере в течение 3 сут. После промораживания трубы смазывали техническим ва-

Таблица 5

Распределение влажности W (в. д.е.) по длине образцов после 1 года, 1 года и 8 мес, 3 лет и 9 мес и 5 лет воздействия температурного градиента (опробование проведено через 1 см; образца, выдержанного 5 лет, — 1,25 см)

T, °C	Время воздействия температурного градиента					
	1 год	1 год 8 мес.	3 года 8 мес.	5 лет		
	Номера образцов					
	1	2	1	1	2	1
-2,2	0,412 0,410 0,403 0,409 0,404 0,408 0,418 0,426 0,421	0,449 0,432 0,436 0,428 0,423 0,419 0,429 0,426 0,433	0,381 0,396 0,399 0,372 0,371 0,384 0,370 0,391 0,381	0,375 0,389 0,392 0,403 0,397 0,395 0,399 0,393 0,392	0,265 0,375 0,405 0,151 0,304 0,385 0,383 0,382 0,376	0,475 0,460 0,458 0,458 0,461 0,477 0,474 0,467 0,464
-2,7	0,414	0,432	0,377	0,393	0,355	0,464

зелином в местах сварки (для предотвращения сублимации в возможных дефектах сварных швов) и закладывали в отверстия стенки между отсеками). В контрольных образцах из каждой серии ($W = 40$ и 44%, $D_{sol} = 0\%$; $W = 40\%$, $D_{sol} = 0,5\%$) было изучено распределение по длине влажности и засоленности, а также криогенное строение. Криогенная текстура была представлена хаотичными, извилистыми ледяными шлирами, толщиной до 0,5—1,0 мм, вытянутыми в основном вдоль стенок контейнера и равномерно распределенными по длине. В засоленном образце ледяные шлиры были тоньше — до 0,5 мм. Начальное распределение влажности и засоленности было следующим (табл. 3). Характер криогенного строения представлен на рис. 1. Регистрацию температур на торцах образцов вели еженедельно. В период с 02 сентября 1986 г. по 30 апреля 1992 г. температура на «холодной» стенке изменялась в пределах $2,7 \pm 0,3^\circ\text{C}$, на «теплой» — $2,2 \pm 0,3^\circ\text{C}$, понижения и повышения температур происходили согласованно в обоих отсеках, медленно в течение многих месяцев. Образцы были помещены в стенку 15 июля 1986 г.

Первые три образца были изучены 28 января 1987 г. Каждый образец был разрезан на 8 равных частей по длине (по 1,26 см в среднем). Результаты определения влажности и засоленности приведены в табл. 4.

Графически распределение влажности в контрольных образцах и после 6 мес. эксперимента приведено на рис. 2. Визуально в испытанных образцах было как будто заметно некоторое увеличение льдистости за счет шлиров вблизи «холодного» края образцов (рис. 3).

Через год после начала эксперимента, 15 июля 1987 г. была выполнена еще одна разделка образцов. Распределение влажности приведено в табл. 5. Еще спустя 8 мес были получены новые данные (табл. 5). Кроме того, изучено распределение влажности и плотности после 3 лет и 9 мес и 5 лет после начала эксперимента (рис. 3 и табл. 5).

Из представленных материалов следует, что заметного перераспределения влажности не происходит, однако криогенное строение не остается постоянным.

Таким образом, проведенные эксперименты позволили уточнить условия, при которых происходит перераспределение влаги в мерзлых грунтах. В дальнейшем предполагается провести анализ также полученных в этих экспериментах данных по изменению микростроения образцов.

Выводы

1. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований передвижения влаги в талых и мерзлых грунтах свидетельствует о возможности передвижения незамерзшей воды под действием градиента температуры.

2. Условия Амдерминской подземной лаборатории позволяют проводить эксперименты с мерзлыми грунтами большой длительности при постоянных температурных градиентах. Несколько образцов, установленных в стенки лаборатории, выдерживались в течение 5 лет.

3. В результате проведенных экспериментов было установлено, что заметного перераспределения суммарной влажности в полностью водонасыщенных мерзлых грунтах при градиенте температуры около $0,05^\circ\text{C}/\text{м}$ не происходит, однако криогенное строение не остается постоянным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананян А. А. Особенности воды в промерзающих тонкодисперсных горных породах//Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах. М.: Наука, 1972. С. 269—270.
- Глобус А. М. Экспериментальная гидрофизика почв. Л.: Гидрометеоиздат, 1969.
- Гречишев С. Е. Межфазовое взаимодействие в поровой влаге и термореологическая модель мерзлых грунтов//Инж. геология. 1979. № 4. С. 72—85.
- Дерягин Б. В., Чураев Н. В., Муллер В. М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1987.
- Ершов Э. Д. Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах. М.: Изд-во МГУ, 1979. 213 с.
- Ершов Э. Д. Физико-химия и механика мерзлых пород. М.: Изд-во МГУ, 1986.
- Лебедев А. Ф. Передвижение воды в почвах и грунтах//Изв. Донского сельскохоз. ин-та. Т. 3. Ростов н/Д, 1918.
- Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Л.: Гидрометеоиздат, 1965.
- Воуикус Г. І. Movement of soil moisture from small capillaries to the large capillaries of the soil upon freezing//J. Agric. Res. 1923. V. 24. № 5.
- Жумикис А. Р. The soil freezing experiment//Highway Res. Rec. 1967. № 209. P. 86—92.

Московский государственный
университет

Поступила в редакцию
21.I.1994

УДК 541.18:537.538

© 1995 г. Н. И. ГАМАЮНОВ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБРАБОТКА РАСТВОРОВ И СУСПЕНЗИЙ

Предложена теория и проведены расчеты, позволяющие объяснить активизацию воды и ускорение коагуляции частиц в движущихся растворах и суспензиях под влиянием постоянных электрических и магнитных полей.

На физико-химические и физиологические процессы воздействует магнитное поле Земли, а также периодические магнитные возмущения под влиянием активности Солнца. Их энергетический вклад мал, но постоянное или многократное импульсное воздействие может влиять на эволюционный ход развития живой и неживой природы, и в частности способствовать агрегации высокодисперсных частиц и соосаждению их ассоциатов. Огромные массы движущихся растворов в океанах, морях, реках и других водоемах продолжительное время подвергаются воздействию магнитного поля Земли. Это способствует осаждению растворенных веществ и получению осадочных пород.

Месторождения растворимых руд, солей, торфа подвергаются воздействию инфильтрационных и грунтовых вод. В почвенных горизонтах переносятся большие массы растворенных веществ, в том числе внесенных в виде органических и неорганических удобрений. Возникающие при этом растворы поступают в реки и водоемы. Из-за высокой концентрации растворенных веществ применять такую воду без водоочистки для бытовых и технических целей обычно нельзя.

В городах и сельской местности различными предприятиями, в том числе и коммунального хозяйства, сбрасываются загрязненные промышленные и бытовые воды. Некоторые производства требуют больших масс воды. В связи с этим возникает потребность ее многократного применения, в частности при гидровскрышных работах в карьерах для добычи полезных ископаемых. Так, на гидровскрышных работах на Курской магнитной аномалии требуется не только складирование меловых и глинистых пород и хвостов путем ускорения их соосаждения, но и увеличение скорости водоотдачи гидроотвалов [10]. Применение обычных химических коагулянтов для этих целей существенно удороожает стоимость водоочистки и требует выделения и утилизации этих, в большинстве случаев экологически вредных веществ.

В связи с этим возникает необходимость разработки новых способов очистки воды. Один из таких способов — электромагнитная обработка (ЭМО) потоков растворов и суспензий в скрещенных электрических и магнитных полях. ЭМО является экологически чистым, перспективным и относительно дешевым способом очистки бытовых и промышленных вод. Развитие этого метода водоочистки сдерживается отсутствием теории, позволяющей направленно вести поиск оптимальных условий ЭМО.

Опыты, проведенные с тонкодисперсными глинистыми суспензиями [31] в скрещенных электрических и магнитных полях, показали, что при ЭМО эффективность соосаждения при напряженности электрического поля $E_0 = 3 \text{ В/см}$ по отношению к магнитной обработке (МО) возрастает приблизительно в 2 раза. При напряженности $E_0 > 3 \text{ В/см}$ увеличения осветления суспензии не наблюда-

лось. Из этих опытов также следовало, что более эффективно воздействие магнитного, чем электрического поля.

Максимальный эффект МО наблюдается при определенных значениях скорости потока V раствора, суспензии и индукции магнитного поля B . Значения B , при которых обнаруживается этот эффект, невелики (десяти доли тесла). Малы соответственно и удельные энергии магнитного поля. При кратковременном (доли секунды) пребывании водной системы в магнитном поле эффект МО, постепенно снижаясь, сохраняется в течение нескольких часов. Совместное воздействие электрических и магнитных полей при определенных параметрах этих полей имеет свои особенности. Имеющиеся гипотезы [3, 18, 19, 24, 27, 28, 33] не могут с единых позиций объяснить все (или хотя бы большую часть) полученные в опытах результаты ЭМО растворов и суспензий.

Следует отметить, что при большом числе исследований в настоящее время мало надежных, воспроизводимых и систематизированных экспериментальных результатов. Из всей совокупности экспериментальных исследований следует выделить достоверные опыты, в которых наблюдается уменьшение накипи в трубках теплообменников [18, 19] и ускоряется коагуляция и седиментация дисперсных частиц после магнитной обработки [8, 10, 18, 27, 30]. Теоретическому рассмотрению этих вопросов посвящена настоящая статья. Изложенные ниже представления позволяют объяснить многие известные экспериментальные результаты ЭМО растворов, суспензий и паст. Эти представления применимы к любым частицам, имеющим в водной среде двойной электрический слой (ДЭС) ионов.

В бытовой и технической («водопроводной») воде, поступающей из различных водоемов и скважин, всегда имеются примеси: растворенные неорганические и органические вещества, пузырьки газов, коллоидные частицы, взвеси, микроорганизмы и пр. Водопроводная вода различных регионов существенно различается по составу растворенных в ней веществ [32]. Кроме того, минеральный состав изменяется в течение года из-за поступления инфильтрационных вод в период дождей и таяния снега. Этим, в частности, можно объяснить тот факт, что положительные результаты ЭМО, полученные на конкретной исследуемой суспензии или растворе, не воспроизводятся в других географических пунктах или даже в той же местности в разные периоды года [18]. Изменение состава электролита и взвесей требует соответствующих изменений оптимальных условий ЭМО.

С изменением количества, состава и дисперсности примесей иными становятся физико-химические свойства растворов и суспензий: поверхностное натяжение, вязкость, растворяющая способность и другие характеристики. В свою очередь, изменение свойств растворов оказывает влияние на интенсивность физико-химических и биологических процессов в водных средах.

До настоящего времени нет общепризнанной модели структуры воды. Вода является ассоциированной жидкостью. Молекулы воды взаимодействуют с ионами. Предложены различные типы надмолекулярной структурной организации растворов и характеристики этих структур [2, 12, 13, 23, 29].

Из всего многообразия рассмотрим следующую упрощенную модель взаимодействия молекул воды с ионами. Все молекулы воды в растворе можно условно разделить на свободные и связанные [7]. Свободные молекулы вследствие взаимодействия через водородные связи при температуре, не превышающей 333 К, стремятся к упорядочению, к образованию кластеров («мерцающих групп») с льдоподобной структурой. Диэлектрическая проницаемость такой воды $\epsilon = 80$. Связанные молекулы входят в состав гидратных оболочек ионов и адсорбированы на поверхности частиц различной дисперсности. Совокупность связанных молекул воды имеет значения $\epsilon = 2 \div 30$ [9, 23].

Свободные молекулы — активная составляющая растворителя. Они способствуют из-за высоких значений ϵ диссоциации молекул кислот и солей, активно взаимодействуют с поверхностями твердых тел. Активация воды связана, как нам

представляется, с удалением примесей из нее, увеличением доли свободных молекул в растворителе. Известна высокая активность свежедистиллированной, талой и дождевой воды. Однако полностью удалить из воды примеси и ионы (в частности, H^+ и OH^-) невозможно. Активизировать воду можно с помощью ЭМО, а также другими методами, способствующими образованию центров кристаллизации, конденсации вещества, коагуляции и седиментации осадка и выноса его из раствора, а также удалению растворенного газа. Эффективность ЭМО водных дисперсий увеличивается, если она сочетается с известными физическими и химическими методами очистки воды [32].

Известно, что любое вещество имеет предел растворения. По мере растворения свободные молекулы вследствие сольватации становятся динамически «связанными». При предельном растворении какого-либо химического соединения свободных молекул уже недостаточно для того, чтобы происходила последующая диссоциация или отщепление молекул или ионов с поверхности кристаллов. По мере удаления свободных молекул вследствие испарения или других причин будет наблюдаться обратный процесс — образование кристаллов и переход связанных молекул растворителя в свободные.

Зародыши кристаллов выше критического размера получаются либо за счет постепенного роста его из возникающих вследствие флуктуаций ассоциатов ионов [22], либо путем коагуляции первичных субмикрокристаллов-кластеров [1]. При соударениях и внешних воздействиях кластеры могут объединяться, образуя более крупные агрегаты. Отдельные первичные кластеры, входящие в эти агрегаты, имеют лишь коагуляционные контакты, между ними имеются зазоры. Такие объединения субмикрочастиц малопрочны и при внешних воздействиях (в частности, в турбулентном потоке) могут разрушаться. Но со временем диффундирующие во внутрь зазоров из раствора ионы обоих знаков, конденсируясь, могут создавать фазовые контакты между отдельными кластерами нераспавшихся агрегатов. Заполнение дефектов ионами происходит вплоть до получения монолитного зародыша. Если скорость заполнения дефектов отстает от скорости роста кристалла, то число дислокаций в нем будет возрастать. В работах [1, 34] показано, что постоянное электрическое поле способствует увеличению зародышобразования в расплавах диэлектриков и полупроводников, а магнитное поле — в расплавах металлов.

При теоретическом рассмотрении механизма воздействия электрического и магнитного полей автор исходил из следующих предположений. В растворах и суспензиях под влиянием этих полей происходит локальное «сжатие» ДЭС малых по размерам частиц [4–6], приводящее к быстрой коагуляции по Смолуховскому. Одновременно происходит гетерокоагуляция более крупных кристаллов, которую наблюдали многие исследователи [18, 25, 26, 28]. Подтверждением этих явлений служит снижение электропроводности воды после магнитной обработки [18], причиной которого может быть переход в кристаллическое состояние или адсорбция находящихся в растворе ионов, их ассоциатов и молекул на частицах различной дисперсности. В частности, переход соединений кальция из ионно-дисперсного в кристаллическое состояние и удаление их из потока способствует активизации воды, которая, в свою очередь, приводит к снижению и даже исчезновению накипи на стенах теплообменников [18, 19].

Находящиеся в растворе микропузырьки газов имеют на границе раздела газ — жидкость поверхностный заряд и электронейтрализующий его слой противоионов, препятствующий их слипанию при соударении. На диффузный слой вокруг пузырьков газа, так же как и на ДЭС твердых частиц, могут действовать электрическое и магнитное поля. Это должно приводить к коалесценции и последующему удалению пузырьков газа из жидкости.

Согласно теории ДЛФО [14, 15, 20], причиной коагуляции частиц и коалесценции пузырьков газа в водной среде является снижение ионно-электростатического барьера отталкивания. Предполагается, что на частицу, имеющую ДЭС и поступательно перемещающуюся со скоростью v , действуют внешнее электриче-

ское поле с напряженностью E_0 и сила Лоренца, которые приводят к локальному сдвигу противоионов из диффузного в слой Штерна. При этом часть противоионов адсорбируется на поверхности твердых частиц (или конденсируется на границе газ — жидкость), а остальная часть возвращается обратно в диффузный слой. Следует отметить, что работа по перемещению по дуговым траекториям зарядов под действием силы Лоренца равна нулю. В водной среде сила Лоренца равна силе вязкого сопротивления, которое оказывает среда дрейфу иона — силе Стокса [4]. Работу по перемещению частиц со средней скоростью v совершают водный поток. Соударение коагулирующих частиц происходит за счет тепловой [21] и механической энергии (из того же потока).

Рост числа противоионов на поверхности частиц приводит к снижению штерновского потенциала $|\Psi_d|$ и соответственно к уменьшению барьера отталкивания. Адсорбированные ионы со временем переходят в диффузный слой. Механизмы укрупнения частиц или пузырьков газа вследствие коагуляции и коалесценции подобны. Поэтому ниже рассмотрен только механизм коагуляции под влиянием ЭМО.

Предполагается, что скорость переноса ионов в слой Штерна существенно меньше, чем темп восстановления нового больцмановского распределения ионов в диффузном слое в связи с понижением $|\Psi_d|$. Поэтому распределение любых i -тых противоионов в момент времени t можно считать квазиравновесным, зависящим только от величины $\Psi_d < 0$:

$$c_{di}^+ (t) = c_{\infty i}^+ \exp(\tilde{\Psi}_d), \quad (1)$$

где c_{di} — соответственно концентрации противоионов на границе штерновского и диффузного слоев и в бесконечном удалении от поверхности частиц; $\tilde{\Psi}_d = Fz_i \Psi_d / (RT)$ [16]. В дальнейших расчетах не учитывается перенос в слой Штерна подвижных ионов, одинаковых по знаку с потенциалообразующими ионами, так как их концентрация вблизи (для определенности, отрицательно заряженной) поверхности мала. Их перемещение в электрическом и магнитном полях происходит в направлении, обратном направлению переноса противоионов (катионов). Вследствие переноса катионов возникает ток в одной полусфере частицы. Нормальная составляющая потока катионов равна:

$$j_n = \sum_{i=1}^{\infty} c_i F z_i \lambda_i (E_0 + [v \times B])_n = \sum_{i=1}^{\infty} c_i F z_i w_{ni}, \quad (2)$$

где c_i — концентрации i -тых противоионов, λ_i — их подвижности, v — скорость перемещения частицы совместно с ДЭС; w_{ni} — нормальная составляющая скорости переноса катионов в слой Штерна (знак плюс опущен). Согласно уравнению (2) катионы перемещаются под действием нормальных составляющих E_0 и $E_m = [v \times B]$, параллельных вектору напряженности E самой частицы (рис. 1). Перенос катионов вызывает новое неравновесное распределение диффузного слоя в левой полусфере. На рис. 1 оно обозначено кривой АКС. В правой полусфере ток пренебрежимо мал, так как

$$|E_0 + E_m|_n \ll |E|_n.$$

Если в течение пребывания в электрическом и магнитном полях частица совершает дополнительное вращательное движение, то диффузный слой будет деформирован на большей части ее поверхности, но с меньшим снижением потенциала $|\Psi_d|$.

Время пребывания частиц в электрических и магнитных полях может быть разным: кратковременным в аппаратах ЭМО и продолжительным (например, в магнитном поле Земли). При продолжительном времени воздействия необходимо учитывать поступление и десорбцию ионов из слоя Штерна. Адсорбция на

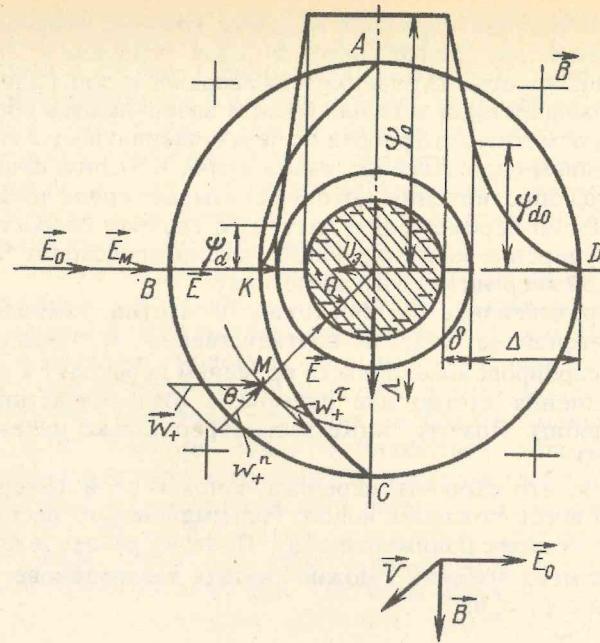


Рис. 1. Деформация диффузного слоя Δ и перенос ионов в слой Штерна δ в скрещенных электрическом E_0 и магнитном $B = [v \times B]$ полях

поверхности частицы противоионов вызывает снижение поверхностного заряда σ_d на границе штерновского и диффузного слоев. Темп уменьшения первоначального поверхностного заряда σ_{d0} зависит от притока противоионов из диффузного слоя и десорбции их из слоя Штерна. Предположим, что перенос ионов к поверхности частицы пропорционален нормальной составляющей скорости w_n и отношению числа свободных центров адсорбции на этой поверхности — связанных коионов [4, 5] — к их количеству в начальный момент адсорбции. Это отношение в свою очередь пропорционально σ_d/σ_{d0} . Связанные коионы создают первый (внутренний) слой Гельмгольца с потенциалом $|\psi_0|$ (рис. 1). Темп десорбции из слоя Штерна пропорционален количеству адсорбированных ионов и обратно пропорционален «времени жизни» τ на связанных коионах. С учетом приведенных замечаний и предположений можно записать

$$\frac{d\sigma_d}{dt} = - \sum_{i=1}^n a_i F z_i w_{ni} c_{di} \frac{\sigma_d}{\sigma_{d0}} + \frac{\sigma_{d0} - \sigma_d}{\tau}, \quad (3)$$

где a_i — коэффициенты, учитывающие долю адсорбированных i -тых ионов к доле переместившихся в слой Штерна.

Для бинарного симметричного электролита (индекс $i = 1$ в дальнейшем опускается)

$$\sigma_d = 2 \sqrt{2 \epsilon_0 \epsilon R T c_\infty} \operatorname{sh}(\tilde{\psi}_d/2), \quad (4)$$

ϵ_0 — электрическая постоянная.

При $(\tilde{\psi}_d/2) \ll 1$

$$\sigma_d = \epsilon_0 \epsilon \kappa \psi_d, \quad (5)$$

$\kappa = [2(Fz)^2 c_\infty / (\epsilon_0 \epsilon R T)]^{1/2}$ — величина, обратная дебаевскому радиусу экранирования.

Полагая в уравнении (1), (3) $\exp(\tilde{\psi}_d) \approx 1 + \tilde{\psi}_d$, с учетом (5) после интегрирования и преобразований имеем для бинарного симметричного электролита

$$\frac{1 + b + 2b\tilde{\psi}_{d0} + c}{1 + b + 2b\tilde{\psi}_{d0} - c} \cdot \frac{1 + b + 2b\tilde{\psi}_d - c}{1 + b + 2b\tilde{\psi}_d + c} = \exp\left(-\frac{ct}{\tau}\right), \quad (6)$$

где $b = \alpha \omega_n \tau / (2\tilde{\psi}_{d0})$, $c = [(1+b)^2 + 4b\tilde{\psi}_{d0}]^{1/2}$. Время «жизни» противоиона

$$\tau = \tau_0 \exp(U/RT), \quad (7)$$

где U — энергия взаимодействия противоиона с заряженной поверхностью частицы. Превалирующим при наличии связанных коионов является электростатическое взаимодействие их с противоионами. Энергию этого взаимодействия можно оценить по формуле

$$U = \frac{(Fz)^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon N_0\delta}, \quad (8)$$

где N_0 — число Авогадро, $\delta \approx 0,5$ нм — толщина слоя Штерна.

Расчеты по формуле (8) показали, что значения U существенно зависят от заряда взаимодействующих ионов z и диэлектрической проницаемости адсорбированных слоев молекул воды в слое Штерна. При $z = 2$ и снижении ϵ от 30 до 10 значения τ в связи с изменением U возрастают от долей секунды до нескольких сотен часов и более. Из этих расчетов следует, что в слое Штерна могут адсорбироваться и оставаться в нем определенное время противоионы, взаимодействующие со связанными коионами [4]. Время десорбции противоионов определяет время «памяти» электрической и магнитной обработки. Если энергия взаимодействия U мала, то $\sigma_d \rightarrow \sigma_{d0}$, $\psi_d \rightarrow \psi_{d0}$ и начальное распределение ионов в ДЭС после ЭМО быстро восстанавливается. Если τ велико и $b \gg 1$, то при $\tilde{\psi}_{d0} \ll 1$, $c \approx b$ выражение (6) преобразуется:

$$\frac{\psi_d}{\psi_{d0}} \approx \exp\left(-\frac{\alpha \omega_n t}{2\tilde{\psi}_{d0}}\right), \quad (9)$$

При стремлении $w_n t \rightarrow \infty$, $\psi_d \rightarrow 0$, т. е. при больших напряженностях внешнего электрического и магнитного полей и времени их воздействия, ДЭС будет «сжат» до слоя Гельмгольца.

При малом времени воздействия $t_0 \ll t$ получим уравнение десорбции ионов из слоя Штерна:

$$\frac{d\sigma_d}{dt} = \frac{\sigma_{d0} - \sigma_d}{\tau}. \quad (10)$$

После интегрирования (10) при условии $\sigma_d = \sigma_{dh}$ при $t = t_0$ получим:

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_{d0}} = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_{dh}}{\sigma_{d0}}\right) \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right). \quad (11)$$

Подставляя в (11) вместо поверхностных зарядов соотношения (4) или (5), можно определить потенциалы ψ_d . Максимальное снижение абсолютного значения потенциала ψ_{dm} можно получить при $E_0 \perp B \perp v$ (рис. 1).

Для этого случая, полагая в (9) $\tilde{\psi}_d < \tilde{\psi}_{d0} \ll 1$ с учетом (5) и условия $t_0 \ll t$ после преобразования уравнения (11), получим:

$$\frac{\psi_{dm}}{\psi_{d0}} = 1 - \frac{\kappa\lambda}{2\tilde{\psi}_{d0}} (\alpha_1 E_0 t_{01} + \alpha_2 LB) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (12)$$

где $L = vt_{02}$ — расстояние, которое проходит раствор или суспензия в постоянном магнитном поле, перпендикулярном потоку; t_{01}, t_{02} — время; α_1, α_2 — коэффициенты, учитывающие долю адсорбированных на поверхности частиц противоионов относительно всех поступивших в слой Штерна, соответственно при воздействии электрического и магнитного полей; λ — подвижность противоионов.

Из уравнения (12) следует, что после кратковременного пребывания t_0 в скрещенных электрическом и магнитном полях штерновский потенциал ψ_{dm} релаксирует до равновесного значения ψ_{d0} . Время релаксации зависит от электростатического и молекулярного взаимодействия противоионов со связанными коионами и поверхностью частицы.

Слабые электрические и магнитные поля не могут существенно изменить адсорбционный потенциал на поверхности частиц. Однако эти поля, как показано в работах [4, 18], могут приводить к изменению адсорбированных слоев жидкости. В связи с этим можно предположить, что доля влияния сольватных, адсорбированных слоев на расклинивающее давление при ЭМО меньше, чем роль ДЭС вокруг частиц. Другие составляющие расклинивающего давления [15] в расчетах не учитывались.

Энергия взаимодействия между сферическими частицами различных радиусов r равна [17]:

$$\Delta U = U_m + U_b, \quad (13)$$

где энергия молекулярного притяжения

$$U_m = -\frac{Ar_2}{6h(1+r_2/r_1)(1+1,77p)} \quad (14)$$

для $0 < p < 2$; $p = 2\pi h/\lambda$; $h \ll (r_1, r_2)$, $r_1 > r_2$ или

$$U_m = -\frac{2Ar_2}{h(1+r_2/r_1)} \left(\frac{2,45}{60p} - \frac{2,17}{180p^2} + \frac{0,59}{420p^3} \right) \quad (15)$$

для $0,5 < p < \infty$; A — постоянная Гамакера; r_1, r_2 — радиусы взаимодействующих частиц, λ — характерная длина волн, h — расстояние от поверхности частицы.

Энергия ионно-электростатических сил отталкивания, возникающая при контакте двух частиц с штерновскими потенциалами ψ_{d1} и ψ_{d2} , рассчитывается по формуле

$$U_i = C \{(1+a) \ln [1 + \exp(-\kappa h)] + (1-a) \ln [1 - \exp(-\kappa h)]\}, \quad (16)$$

$$a = 2 \frac{\psi_{d1}}{\psi_{d2}} / \left[1 + \left(\frac{\psi_{d1}}{\psi_{d2}} \right)^2 \right], \quad C = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon r_2 \psi_{d2}^2}{(1+r_2/r_1)} \left[1 + \left(\frac{\psi_{d1}}{\psi_{d2}} \right)^2 \right].$$

Были проведены расчеты [5, 6] при значениях $A = 10^{-19}$ и $2 \cdot 10^{-19}$ Дж, $\epsilon = 80$, $\lambda = 10^{-7}$ м, $\psi_{d2} = 20$ и 50 мВ, $z = 2$, r_1 и $r_2 = 10^{-4} \dots 10^{-8}$ м, $\kappa = (2,08 \cdot 10^7 \dots 1,33 \cdot 10^8) \text{ м}^{-1}$. Этим значениям κ соответствуют концентрации симметричного двухвалентного электролита $10^{-5} \dots 4 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Двухвалентные ионы кальция и магния наиболее часто можно обнаружить в ионном составе водопроводной воды.

В расчетах предполагалось, что взаимодействие частиц происходит по направлению, параллельному векторам E_0 и E_m (рис. 1). В контакт входят частицы

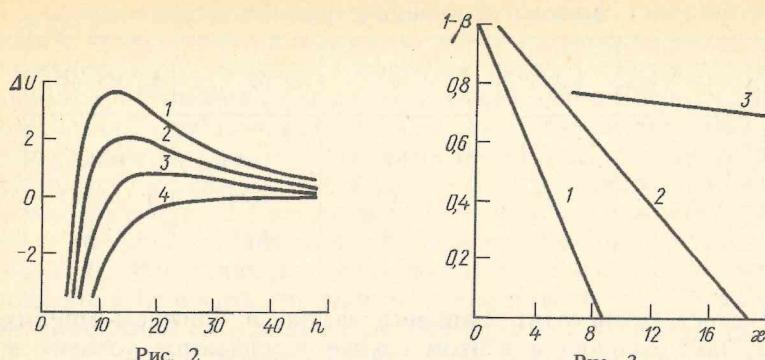


Рис. 2

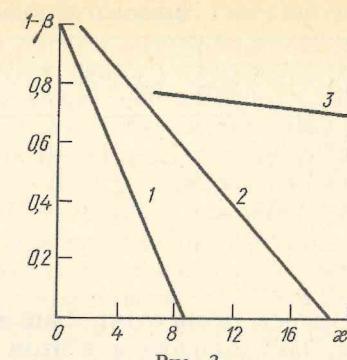


Рис. 3

Рис. 2. Распределение энергии взаимодействия $\Delta U \cdot 10^{-20}$ Дж от расстояния h (нм) между частицами радиусом $r_1 = r_2 = 0,1$ мкм при $\beta = 1$ (1); 0,75 (2); 0,5 (3); 0,25 (4)

Рис. 3. Зависимость $(1 - \beta)$ от $\kappa \cdot 10^8, \text{ м}^{-1}$

различных радиусов. У одной частицы радиусом r_1 диффузный слой деформирован, и она имеет штерновский потенциал $\psi_{d1} < \psi_{d0}$; у другой частицы радиусом $r_2 \leq r_1$ диффузный слой не деформирован и потенциал $\psi_{d2} = \psi_{d02} = \psi_{d01}$.

Как следует из рис. 2, частицы с одинаковым радиусом 0,1 мкм не могут слипаться, так как величина ионно-электростатического барьера отталкивания превышает энергию теплового движения частиц $5 \text{ кТ} \approx 2 \cdot 10^{-20}$ Дж. Однако по мере снижения $\beta = \psi_{d1}/\psi_{d2}$ вероятность коагуляции возрастает. При $\beta \leq 0,25$ частицы беспрепятственно слипаются в первичном минимуме.

Значения энергии взаимодействия частиц с одинаковым радиусом $r_s = 10^{-7}$ м можно получить умножением масштаба оси ординат (рис. 2) в s раз. Если $h > 50$ нм, то у крупных частиц имеется вторичный минимум, который может превышать 5 кТ. При наличии вторичного минимума возникают слабые взаимодействия между крупными частицами полидисперсной системы и адсорбция мелких на крупных, что может приводить к стабилизации отдельных фракций системы [17]. Этим, в частности, можно объяснить экспериментально наблюдаемую полизэкстремальную зависимость эффекта МО от индукции магнитного поля, направленной перпендикулярно потоку суспензии [4].

Обработка результатов (рис. 3) позволила получить линейное уравнение

$$1 - \beta = b - mx. \quad (17)$$

Значения b и m приведены в таблице.

С учетом уравнений (12), (13) при $t = 0$ имеем

$$G = (a_1 E_0 t_{01} + a_2 LB) \geq \frac{2\tilde{\psi}_{d0}}{\lambda \cos \theta} (b\kappa^{-1} - m). \quad (18)$$

Для $\Delta U \leq 0$ необходимо, чтобы фактор воздействия внешних полей G был равен или превышал правую часть уравнения (18). С увеличением κ значения G снижаются. При $\kappa = \kappa_m = b/m$ фактор $G = 0$. В таблице приведены значения κ_m и соответствующие им концентрации бинарного симметричного электролита, ионы которого имеют заряд $z = 2$. Из таблицы следует, что при снижении константы Гамакера A и увеличении начального штерновского потенциала частицы $\psi_{d01} = \psi_{d02} = \psi_{d0}$ значения κ_m и соответствующие им концентрации электролитов возрастают. Наиболее эффективно ЭМО при $\kappa \rightarrow \kappa_m$, т. е. когда суспензия близка к порогу коагуляции. При $\kappa \geq \kappa_m$, т. е. при малой толщине

№ п/п	$A \cdot 10^{-19}$, Дж	ψ_{d0} , мВ	b	$m \cdot 10^{-9}$, м	$\kappa_m \cdot 10^8$, м ⁻¹	$c_\infty, z = 2$, моль/л
1	2	20	1,0	11,56	0,865	$1,75 \cdot 10^{-4}$
2	1	20	1,07	6,43	1,668	$6,5 \cdot 10^{-4}$
3	1	50	0,8	0,637	12,56	$3,6 \cdot 10^{-2}$

диффузных слоев происходит слипание частиц в ближнем минимуме и без воздействия ЭМО. Однако и в этом случае улучшаются условия коагуляции за счет углубления и расширения потенциальной ямы (рис. 2, кривая 4).

Согласно расчетам для частиц радиусом $r_1 = r_2 < 0,1$ мкм при больших значениях κ коагуляция может происходить и без воздействия электрических и магнитных полей, так как величина $\Delta U_{\max} < 5$ кТ (рис. 2, $s < 1$). С уменьшением концентрации электролита роль ЭМО несколько возрастает, но существенно снижается вероятность образования кластеров и их агрегирование.

Увеличение температуры оказывает влияние на коагуляцию [15, 20]. При ЭМО, кроме этого, снижается время релаксации потенциала ψ_d до равновесного из-за уменьшения τ (12).

В общем случае значение $\beta_0 = \psi_{d1}/\psi_{d0}$, при котором ионно-электростатический барьер равен нулю, с учетом, что $p < 2$, можно найти из системы уравнений

$$\Delta U = U_m + U_i|_{h=h_m} = 0$$

$$\frac{\partial \Delta U}{dh} = -U_m \frac{1 + 2vh}{h(1 + vh)} - 2C\kappa e^{-\kappa h} \frac{a - e^{-\kappa h}}{1 - e^{-2\kappa h}}|_{h=h_m} = 0, \quad (19)$$

где $v = 1,77 \cdot 2 \pi / \lambda = 1,1 \cdot 10^8$, м⁻¹ и h_m — значение h , соответствующее $\Delta U = 0$. Если $\exp(-\kappa h_m) \ll 1$ и $a \rightarrow 1$ (что возможно, так как при $\kappa \rightarrow \kappa_m \beta \rightarrow 1$ и $a = [2\beta/(1 + \beta^2)] \rightarrow 1$), то значения h_m и β_0 можно приблизенно определить по формулам

$$h_m \approx \frac{1}{2v} (\sqrt{1 + 4(v/\kappa)^2} + 2v/\kappa - 1), \quad (20)$$

$$\beta_0 \approx A\kappa \exp(\kappa h_m) / [24\pi\epsilon_0 e (1 + 2vh_m) \psi_{d0}^2]. \quad (21)$$

Из последнего соотношения следует, что значения β_0 прямо пропорциональны $A\kappa$ и обратно пропорциональны ψ_{d0}^2 .

Приведенные расчеты позволяют объяснить результаты ЭМО супензий. В работах [5, 31] отмечается, что относительная эффективность воздействия магнитного поля выше, чем электрического. Это вызвано, согласно изложенной в настоящей работе концепции, следующими причинами: 1) в электрическом поле при электрофорезе из-за переноса ионов в диффузном слое и поляризации частиц можно ожидать некоторое уменьшение концентрации противоионов в левой полусфере по отношению к правой (рис. 1), что снижает их дрейф в слой Штерна; в слабых магнитных полях электрофорезом и поляризацией коллоидных частиц можно пренебречь; 2) при наложении электрического поля не все поступившие в слой Штерна катионы за время t_0 адсорбируются на связанных анионах, так как адсорбция происходит по закону Ленгмюра; 3) по мере экранирования отрицательного заряда поверхности частицы и уменьшения ψ_d возрастает вероятность диффузии в слой Штерна свободных анионов; 4) затруднен перенос ионов при высоких концентрациях сильных электролитов, так как снижается подвижность ионов [21]; 5) существенным становится влияние собственного объема иона с

гидратной оболочкой внутри тонкого штерновского слоя; 6) при электрофоретическом движении поперек потока жидкости возможно разрушение первичных ассоциатов, взаимодействие частиц в которых происходит во вторичном минимуме. Перечисленные сопутствующие явления существенно снижают относительный эффект воздействия электрического поля по отношению к магнитному.

Воздействия электрических и магнитных полей на студни гидрофильных высокомолекулярных соединений будут иными, чем для гидрофобных коллоидов. Гидрофильные органические вещества имеют другие механизмы поглощения влаги [11] и образования диффузного слоя противоионов вокруг ассоциатов макромолекул [7]. ЭМО таких систем требует специального рассмотрения. Однако априори можно предположить, что электрические и магнитные поля будут воздействовать на диффузные слои ассоциатов. Это должно приводить к их слипанию и образованию «структур переплетения». При кратковременных воздействиях нельзя ожидать существенных изменений для таких систем, так как время релаксации диффузного слоя будет малым, но эффект МО будет возрастать с увеличением времени экспозиции.

Не все аспекты этой сложной проблемы нашли отражение в данной работе. Дополнительную информацию можно найти в ранее опубликованных работах [4—6]. В работе [4] рассмотрены особенности поведения частиц различного размера в ламинарном и турбулентном потоках, а также эффективность конструкций различных аппаратов МО соленоидного типа, постоянной и переменной полярности. Предпочтение следует отдавать магнитам, напряженность которых перпендикулярна потоку жидкости. В работе [4] обсуждаются также причины поликстремальной зависимости эффективности МО, в частности прочностных и реологических характеристик осадка, от напряженности магнитного поля. Приведено также обсуждение результатов экспериментов [31] по седиментации тонкодисперсных глинистых частиц при совместном воздействии скрещенных (электрического и магнитного) полей на основе развивающихся нами представлений [5].

Таким образом, предложенный в настоящей работе механизм воздействия ЭМО на растворы и супензии позволяет объяснить многие явления, наблюдавшиеся в экспериментах. Он может уточняться и детализироваться с учетом специфических свойств (в частности, ферромагнитных) водных дисперсий.

Выводы

- Предложена концепция, позволяющая объяснить имеющиеся экспериментальные результаты электромагнитной обработки растворов и супензий. Предполагается, что дисперсные частицы имеют двойной слой ионов. Под действием внешнего электрического поля и силы Лоренца происходит перенос противоионов и их частичная адсорбция в слое Штерна. Время их десорбции соответствует «памяти» ЭМО.

- Адсорбция противоионов вызывает локальное сжатие диффузного слоя, снижение ионно-электростатического барьера отталкивания, что способствует коагуляции твердых частиц и коалесценции пузырьков газа.

- При коагуляции высокодисперсных фракций и коалесценции микропузырьков газа в более крупные, часть адсорбированных и сольватированных молекул воды переходит в свободное состояние; возрастает активность воды, изменяются ее физико-химические характеристики.

- Приведены расчеты коагуляции неферромагнитных частиц различных размеров. Предложено уравнение, позволяющее выбрать параметры электрического и магнитного полей и скорости потока при известных характеристиках дисперсных частиц и дисперсионной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В. Д. Исследование кинетики реального зародышеобразования при кристаллизации переохлажденного расплава и аморфной среды: Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. М.: МИЭТ, 1992.
2. Блох А. М. Структура воды и геологические процессы. М.: Недра, 1969. 216 с.
3. Бондаренко Н. Ф., Гак Е. З. Электромагнитные явления в природных водах. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 152 с.
4. Гамаюнов Н. И. Коагуляция суспензий после магнитной обработки//Журн. прикл. химии. 1983. Т. 56. № 5. С. 1038—1047.
5. Гамаюнов Н. И. Укрупнение частиц в водных потоках при воздействии скрещенных электрических и магнитных полей//Журн. прикл. химии. 1984. Т. 57. № 9. С. 1963—1968.
6. Гамаюнов Н. И. Воздействие постоянных электрических и магнитных полей на заряженные частицы в потоке//Инж.-физ. журн. 1985. Т. 48. Вып. 6. С. 1009—1011.
7. Гамаюнов Н. И. Механизм образования электрического потенциала набухших зерен ионита//ЖФХ. 1990. Т. 64. № 12. С. 3329—3332.
8. Гамаюнов Н. И., Замятина И. Е. Исследование коагуляции суспензии после магнитной обработки//Коллоид. журн. 1982. Т. 44. № 1. С. 117—121.
9. Гамаюнов Н. И., Кошкин В. М. Диэлектрические свойства сорбированной воды//Вода в дисперсных системах. М.: Химия, 1989. С. 242—254.
10. Гамаюнов Н. И., Тарало И. П. Интенсификация процесса осаждения дисперсных частиц после магнитной обработки пульпы//Гидравлика и инженерная гидрология. Калинин: Изд-во КГУ, 1981. С. 131—135.
11. Гамаюнов Н. И., Твардовский А. В. Сорбция водяного пара набухающими гидрофильтральными соединениями//ЖФХ. 1986. Т. 60. С. 3011—3015.
12. Гуриков Ю. В. Роль гидратации ионов в физико-химических и биологических процессах. Л.: Изд-во АФИ, 1982.
13. Гуриков Ю. В. Гидродинамическая модель гидратации ионов//ЖФХ. 1992. Т. 66. № 5. С. 1257.
14. Дерягин Б. В. Современная теория устойчивости лиофобных суспензий. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 235 с.
15. Дерягин Б. В., Чураев Н. В., Муллер В. М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 399 с.
16. Духин С. С., Дерягин Б. В. Электрофорез. М.: Наука, 1976. 328 с.
17. Ефремов И. Ф. Периодические коллоидные структуры. Л.: Химия, 1971. 191 с.
18. Классен В. И. Омагничивание водных систем. М.: Химия, 1982. 286 с.
19. Кривцов В. В. Оптимизация технологии противонакипной магнитной водоподготовки//Автореф. дис. ... канд. техн. наук. К.: КИСИ, 1986. 22 с.
20. Кройт Г. Р. Наука о коллоидах. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 538 с.
21. Курс физической химии. М.: Химия, 1973. Т. II. С. 407.
22. Лишин Е. М., Питаевский Л. П. Физическая кинетика. М.: Наука, 1979. С. 503—516.
23. Лященко А. К. Структурные эффекты сольватации и строение водных растворов электролитов//ЖФХ. 1992. Т. 66. № 1. С. 167.
24. Миненко В. И. Магнитная обработка вододисперсных систем. Киев: Техника, 1970. 167 с.
25. Михельсон М. Л. Исследование поточной ультрамикроскопии для определения ранней кристаллизации в омагниченном растворе//Коллоид. журн. 1983. Т. 45. Вып. 2. С. 352—355.
26. Михельсон М. Л. О магнитной памяти раствора//Коллоид. журн. 1985. Т. 467 Вып. 2. С. 404—405.
27. Осипов Ю. Б. Исследование глинистых суспензий, паст и осадков в магнитном поле. М.: Изд-во МГУ, 1968. 159 с.
28. Погодин В. К. Теоретическое изучение и практическое использование электромагнитного способа обработки воды аппаратами соленоидного типа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИХМ, 1966. 13 с.
29. Самойлов О. Я. Структура водных растворов электролитов и гидратация ионов. М.: Изд-во АН СССР, 1957.
30. Семихина Л. П. Изменение показателя преломления воды после магнитной обработки//Коллоид. журн. 1981. Т. 43. Вып. 2. С. 401.
31. Смыслов П. А. Модельные исследования влияния магнитной обработки на некоторые технологические свойства воды и водных систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Калинин: КПИ, 1967. 20 с.
32. Стерман Л. С., Покровский В. Н. Физические и химические методы обработки воды на ТЭС. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 82.
33. Тимашев С. Ф. О возможной природе замедленной релаксации водных систем//ЖФХ. 1990. Т. 64. С. 1142.
34. Шклляр В. С., Александров В. Д. О гомогенном зародышеобразовании чистых металлов в магнитостатическом поле//ЖФХ. 1988. Т. 62. С. 1921—1922.

Тверской политехнический институт

Поступила в редакцию
12.V.1993

УДК 624.131

© 1995 г. Г. И. РУДЬКО, Г. С. ЛОПАТИНСКИЙ, Н. С. РЯБОВ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ И АКТИВИЗАЦИИ ОПОЛЗНЕЙ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОМ ПРЕДКАВКАЗЬЕ

Представлены результаты исследования массовой катастрофической активизации оползней, произошедших весной 1989 г. в Чечено-Ингушетии. Установлена связь механизмов активизированных оползней различных генетических типов с тектоническим строением территории. Предложены рекомендации по организации и ведению мониторинга оползнеопасных территорий.

Несмотря на политические и экономические проблемы, комплекс геолого-экологических задач, связанных с уменьшением риска от природных катастроф, приобретает все большую актуальность [1, 2]. В статье сделана попытка обобщения закономерностей катастрофического развития оползней в Чечено-Ингушетии в 1989 г. с разработкой рекомендаций по организации и ведению мониторинга оползнеопасных территорий.

Катастрофическая активизация опасных экзогенных геологических процессов, несмотря на многолетний опыт их изучения и многочисленные попытки прогнозирования, как правило, застает человека врасплох. Не является исключением и массовая активизация оползней в марте-апреле 1989 г. в Чечено-Ингушетии. По масштабам проявления эта активизация является одной из самых значительных на территории Кавказского региона в последние десятилетия. В этот период активизировалось 1295 оползней на площади 25 000 км². Пострадало 82 населенных пункта, в которых полностью или частично разрушено 2518 жилых домов, 44 школьных здания, 4 детских сада, 14 сельских медпунктов, 25 клубов, 13 магазинов, 60 сельскохозяйственных строений, 11 зданий административного назначения, более 125 тыс. м² складов и навесов. Сильно пострадали линейные объекты: было разрушено более 60 км асфальтобетонных и 300 км гравийных автомобильных дорог и 102 км линий электропередач. Выведены из строя ряд эксплуатационных нефтяных скважин. Из зоны бедствия в другие районы переселено более 16 тыс. человек (по данным гидрогеологической экспедиции ПГО «Севкавгеология»).

Изложенный в статье материал отражает точку зрения авторов на оползневой процесс как результат тесной взаимосвязи эндогенных и экзогенных условий, а также природно-климатических и техногенных факторов.

Исследуемая территория давно известна как один из наиболее активных оползнеопасных регионов Северного Кавказа. Древнеоползневой рельеф развит в пределах передовых Сунженского и Терского хребтов, а также в зоне Бенойского купола (низко- и среднегорная моноклиналь Кавказских Черных гор). Площадное распространение оползней связано с глинисто-суглинистыми толщами плиоцен-четвертичного, сарматского (верхний миоцен), майкопского (нижний миоцен — верхний олигоцен), эоценового и нижнемелового возраста.

В четвертичной глинисто-суглинистой толще происходит формирование и развитие более 90% всех оползней. Остальные оползни приурочены к следующим литолого-стратиграфическим комплексам:

Инженерно-геологические свойства глинистых пород молласовой формации олигоцен-миоценового возраста (по Цареву Л. В.)

Показатель	Майкопские глины слабо-выветрелые N ₁ —P ₃	Элювий майкопских глин eN ₁ —P ₃	Чокракские и караганские глины N ₁ ^{kg} — γ	Терский и Сунженский хребты	
				N ₁ s ₁₋₂	N ₁ s ₃
Естественная влажность W, %	13—22	17—26	16—28	13—28	16—30
Плотность, г/м ³					
влажного грунта,	2,04—2,29	1,80—2,04	1,88—2,09	1,94—2,29	1,88—2,24
скелета,	1,72—2,01	1,61—1,81	1,54—1,77	1,58—2,00	1,51—1,85
твердой фазы,	2,69—2,87	2,60—2,77	2,62—2,74	2,69—2,77	2,70—2,76
Пористость n, %	13—37	36—44	36—41	27—41	31—44
Содержание частиц 0,005 мм, %	55—85	57—83	49—85	39—85	53—77
Число пластичности I _p	21—41	17—40	17—26	16—41	17—34
Консистенция I _l	0,13—(—0,56)	0,07—(0,052)	—0,62(—0,02)	0,51—(—0,02)	—0,36—(—0,08)
Угол внутреннего трения, φ, гр.	27—35	2—22	13—40	16—41	17—39
Сцепление C, Мпа	0,0375—0,0750	0,016—0,04	0,055—0,094	0,032—0,11	0,03—0,082

верхнесарматскому подъярусу (N₁s₃), представленному темно-серыми глинами средней плотности с прослойями мягких мергелей;

ниже- и среднесарматскому подъярусам (N₁s₁₋₂), представленным темно-коричнево-серыми слоистыми известковистыми глинами с частыми прослойками мергелей, глины при выветривании распадаются на очень тонкие пластинки — «книжные» или «картонные» сланцы, которые очень легко вовлекаются и оползневые подвижки;

караганскому и чокракскому горизонтам (N₁^{kg} — γ): комплекс песчано-глинистых пород с прослойками и линзами мергелей; заканчивается комплекс караганских отложений 12-метровой пачкой глин с частыми прослойками мергелей;

пласту глинистых пород в верхней части разреза альбских отложений: глина бентонитовая, известковистая, зеленовато-серая с высоким содержанием монтмориллонита и гидрослюды, при увлажнении переходит в вязкопластическое состояние.

Инженерно-геологические свойства основных деформирующихся горизонтов (ОДГ) приведены в таблице.

Уровень площадной пораженности оползнями различных литолого-стратиграфических комплексов примерно одинаков. При анализе общих закономерностей распространения оползней и их развития нами была принята следующая классификация.

По механизму формирования выделено три типа оползней.

1. В большинстве случаев произошла катастрофическая активизация оползней скольжения, которые консеквентно смешались вниз по напластованию пород, затем переходили в оползни течения. Они формировались на пологих (от 5 до 18°) склонах моноклинальных плит, в условиях, когда угол падения пластов отличался от крутизны склона не более чем на ±5°. Оползни скольжения достигали мощности до 25 м, смешаясь к овражно-балочным понижениям и нарушая ус-

тойчивость глетчeroобразных массивов, приуроченных к тыловым западинам куэстообразных моноклинальных ступеней. Оползневые системы такого типа с суммарным объемом в несколько миллионов метров в кубе, локализованные в пределах резко очерченных бассейнов, притоков I порядка рек Аксай и Яман-су на северном крыле Бенойского купола, разрушили междуречья практически от водораздела до русла реки.

2. Второй тип оползней — блоковые оползни срезания. Они возникали на участках с падением пород внутрь склона или по склону, но угол их падения превышал крутизну склона более чем на 5° . Глубокие оползни срезания с элементами выдавливания зафиксированы на восточном переклинальном замыкании Бенойского купола в районе сел Пачу и Стерч-Керч. Их объем ~ 20 млн. м³.

3. Третий тип — оползни течения (оползни-потоки). Они составляли $\sim 90\%$ от общего числа оползней и, как правило, были приурочены к рыхлым четвертичным отложениям. При глубине захвата не более 10—12 м объем наиболее крупных из них достигал 1 млн. м³.

Одним из важных условий, определившим развитие оползней, являлось тектоническое строение исследуемой территории. Важную роль здесь играет Бенойская антиклиналь — самое крупное осложнение Черногорской моноклинали. Складка ориентирована в субширотном направлении, имеет протяженность ~ 20 км при максимальной ширине 10 км, относится к типу брахискладок и несколько наклонена к югу. Ее погружение в восточном направлении почти незаметно, в западном — достаточно крутое. Относительная высота антиклинали 290—400 м. После выполнения комплекса работ по оползневому картированию была отмечена четкая взаимосвязь определенных типов оползней с тектоническими элементами структуры.

К южному и северному крыльям антиклинали, имеющим наклон от 20 — 30° до 2 — 8° , приурочены консеквентные оползни скольжения, переходящие в нижней части в оползни течения. Примером такого оползня является оползень Энгеной, сформировавшийся на южной окраине с. Энгеной в верхней части высокого (до 400 м) склона, сложенного залегающими согласно аргиллитоподобными глинами караганского яруса. Он представляет собой гигантский консеквентный оползень объемом ~ 13 млн. м³. В связи с быстрым смещением вниз по склону (до 10—15 м/сут) оползневые пакеты дробились, обводнялись и переходили в вязкопластическое состояние. При этом основное смещение происходило вдоль боковой стенки куэстообразной ступени моноклинальной плиты и имело катастрофический характер — с сильными деформациями поверхности и образованием валов выпирания, что обусловило многочисленные разрушения.

Аналогичным вышеописанному по механизму является Центоройский оползень, имеющий объем более 20 млн. м³. Его катастрофическая активизация началась ночью с 10 на 11 марта 1989 г. в верхней части села рядом со школой в виде блоковой подвижки по напластованию пород с формированием стенки срыва высотой 18—20 м. Затем в результате жестких деформаций оползневые массы дробились. Сильно увлажненная вязкопластичная масса двигалась вдоль балки, сформировавшейся в основании куэстообразной ступени. Активизация оползня привела к разрушению значительной части селения. С несколько меньшей интенсивностью и в меньших объемах оползни данного типа произошли во второй половине марта в пределах склонов долин рек Яман-су и Ярук-су на крыльях Даттыхского, Северо-Бенойского и Ножай-Юртовского антиклинальных выступов (рис. 1).

Блоковые оползни асеквентного срезания (второй тип) приурочены исключительно к осевой части антиклинали, осложненной поперечными разрывами. Примером является оползень Пачу объемом >20 млн. м³, практически полностью разрушивший селение Пачу. Механизм его смещения характеризуется следующими особенностями. В аргиллитоподобных глинах майкопской серии сформировалась ослабленная зона на глубине 40—50 м, которая являлась в дальнейшем зеркалом оползневого смещения. Потенциальная стенка срыва была

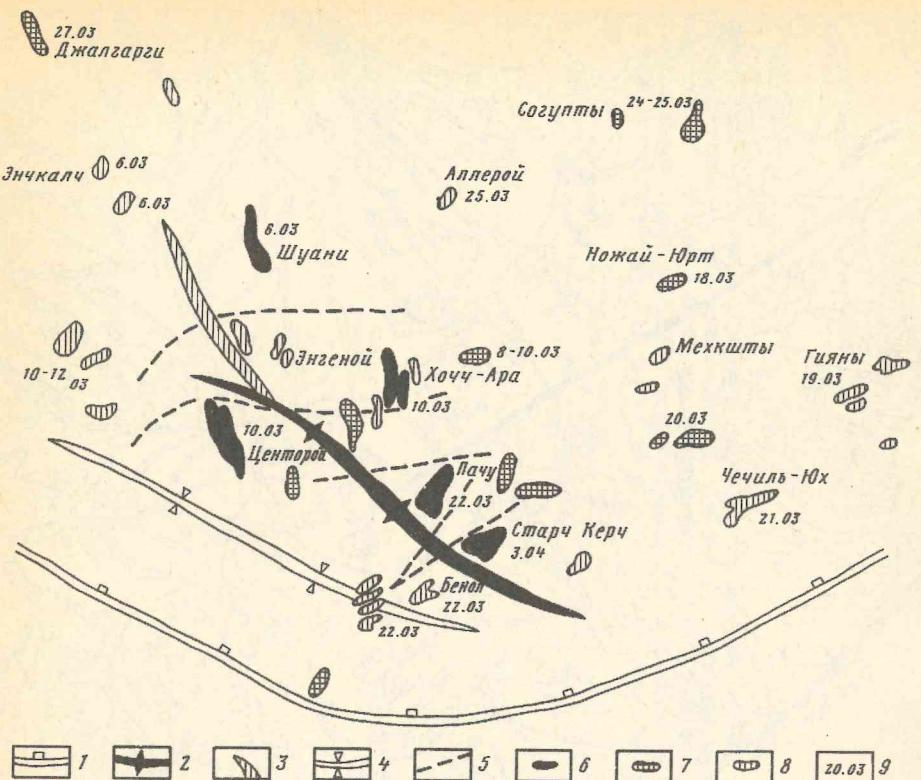


Рис. 1. Структурно-тектонические условия развития оползневого процесса в пределах Бенойского оползневого района: 1 — Черногорская складчатая зона; 2 — Бенойская антиклиналь; 3 — северо-западное погружение Бенойской антиклинали; 4 — Ерсенойская синклиналь; 5 — основные разрывы; объемы оползней, активизация которых произошла весной 1989 г.; 6 — более 5,0 млн. м³; 7 — от 1,0 до 5,0 млн. м³; 8 — от 0,5 до 1,0 млн. м³; 9 — дата катастрофической активизации оползня

приурочена к ослабленной зоне трещиноватости, контролируемой тектоническим нарушением, секущим пласти пород. Смещение основного блока происходило с его вращением, сопровождалось хрупкими деформациями с дроблением на части. Сформировался огромный (высотой до 12—16 м) вал выпирания. Отседание основного блока сопровождалось вертикальными перемещениями 12—15 м и горизонтальными — 3—5 м.

Аналогичный по механизму оползень образовался в районе с. Стерч-Керч. Объем оползневых накоплений составлял ~ 23 млн. м³. В обоих случаях формирование блоковых оползней асеквентного срезания было связано с системой разрывных нарушений, рассекающих склоновые массивы в северо-восточном направлении.

Оползни течения третьего, наиболее распространенного типа связаны с избыточным увлажнением рыхлых четвертичных отложений. Глубина захвата оползневых накоплений 10—12 м, объем наиболее крупных из них достигал 1 млн. м³.

Интенсивно поражены оползнями течения населенные пункты на правобережье р. Хулхулау (села Ца-Ведено, Морзой-Мохк, Эрсеной), р. Гумс (села Тазен-Кала, Белгатой, Шерды-Мохк, Гезенчу), южное и восточное крылья Бенойской антиклинали в окрестностях сел Гуржи-Мохк, Оси-Юрт, Ожи-Юрт, Булгат-Ирзу.

На крыльях Бенойского купола в начале марта сформировались 6 оползней течения объемом от 1 до 5 млн. м³, 10 оползней объемом от 0,5 до 1 млн. м³ и несколько сотен более мелких потоковых форм.

Для Шатойского оползневого района, расположенного в сложной, срезанной

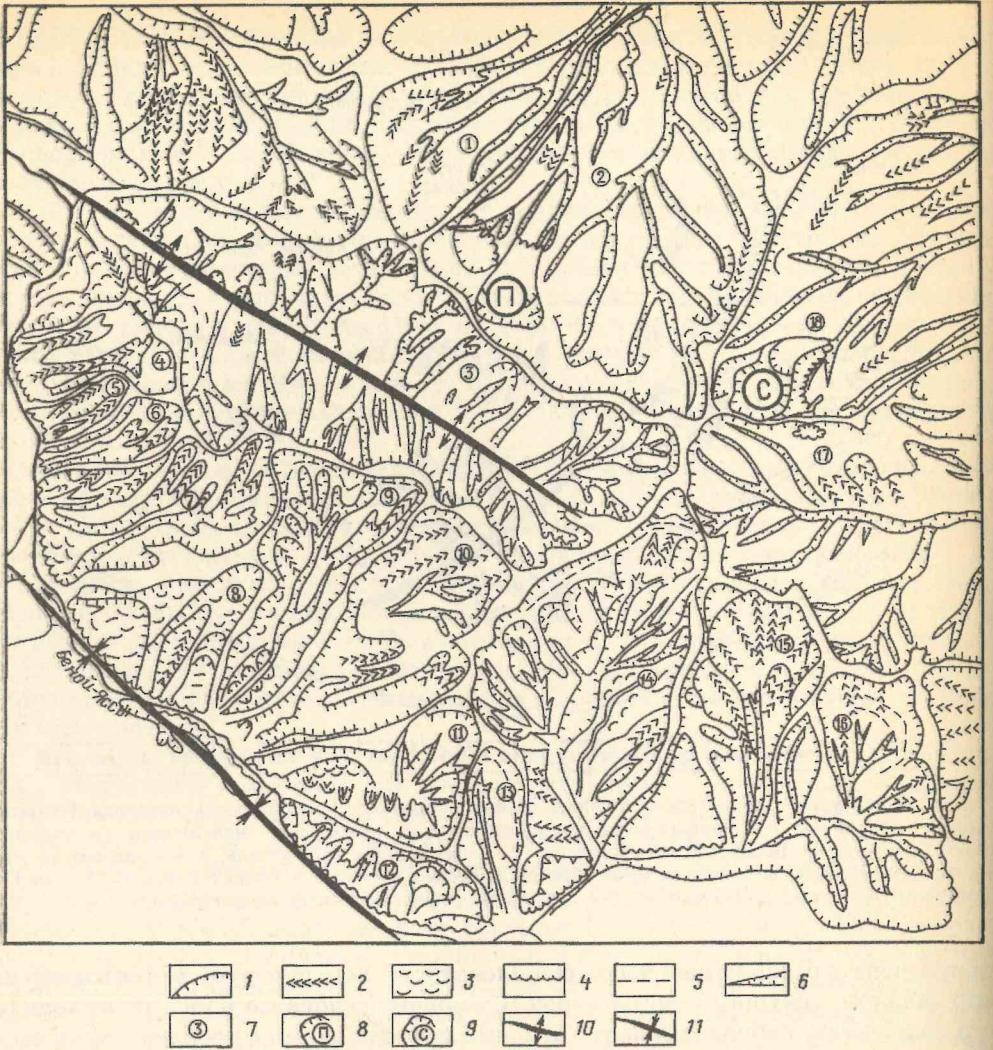


Рис. 2. Схема распространения оползней в пределах Беноинского участка (применительно к масштабу 1 : 25 000): 1 — стенка срыва отдельного оползня или оползневого рельефа; 2 — развитие интенсивной донной эрозии; 3 — оползневая бугристость; 4 — языковая часть оползней; 5 — активные трещинные зоны; 6 — интенсивно растущие овраги; 7 — номер оползня по кадастру; 8 — структурно-tektonический оползень Пачу; 9 — структурно-тектонический оползень Стерч-Керч; 10 — ось Беноинской антиклинали; 11 — ось Ерсенойской синклинали

купольной структуре (Варандийская антиклиналь), преобладали оползни-потоки. В процентном отношении они составляли 98,9% от всех оползней (по данным Рябова Н. С.).

Анализ хронологии проявления оползней различных типов и объемов в зоне их катастрофической активизации выявил ее волнообразный характер.

Первая волна крупных оползней-потоков и консеквентных оползней скольжения в западной и центральной частях зоны в первой декаде марта (6—10.03.1989 г.), вероятнее всего, была связана с интенсивным таянием снега. Затем до 12 марта крупных оползней практически не происходило. Основную массу активизировавшихся оползней составляли мелкие потоки, осовы и оплывины. Вторая волна с 22 марта по 3 апреля 1989 г. была вызвана формированием в юго-восточной части грандиозных блоковых оползней срезания Пачу и Стерч-Керч.

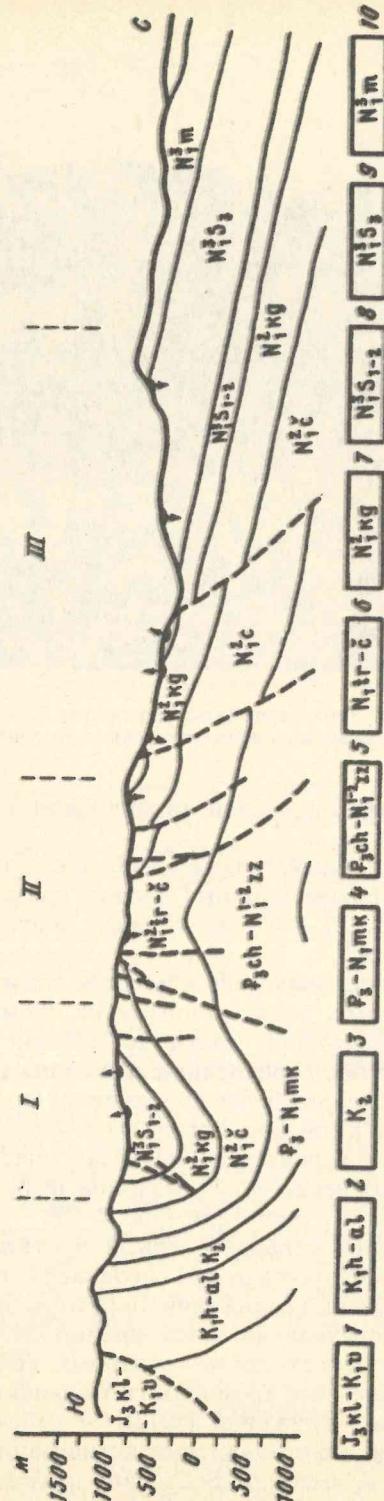


Рис. 3. Схематический геологический разрез в пределах Беноинского участка (применительно к масштабу 1 : 2500). Зоны развития: I — преимущественно консеквентных оползней объемом до 1,5—2,0 млн. m^3 , переходящих в нижней части склона в оползни течения; II — структурно-текtonических оползней, приуроченных к разломам (блоковые оползни срезания объемом до 2,0 млн. m^3 ; III — оползни течения (оползни-потоки) объемом до ,0 млн. m^3 . 1 — гравелисты, конгломераты, песчаники, доломиты, антиклины, известники; 2 — известняки с прослоями доломитов; 3 — глины с прослоями известников и песчаников; 5 — глины, мергели, песчаники; 6 — глины, мергели, песчаники; 7, 8 — глины, мергели; 9 — глинистые сланцы, прослои глинистых мергелей; 10 — глины



Рис. 4. Фрагмент стенки срыва оползня Стерч-Керч. Катастрофическая фаза развития структурно-тектонических (блоковых) оползней, приуроченных к зонам поперечных разломов

Геоморфологические условия Бенойской антиклинали характеризуются следующими особенностями.

Прямой эрозионно-денудационный рельеф преобладает по площади. Сводовая часть антиклинали срезана глубоким оврагом (глубина вреза до 430 м при ширине до 1,0 км). Крутизна склонов 25—40°, на котором широко развиты оползни течения размерами до 25 × 60 м.

Южное крыло складки крутое, выражено в рельефе преимущественно согласными с падением пород формами, расчлененными на элементарные водосборы площадью от 1 км² в юго-восточной части до 2,5 км² в западной, в них формируются оползни скольжения, переходящие в оползни течения (рис. 1, 2).

Северное крыло Бенойской складки более протяженное (до 5 км) и менее пологое. Крутизна поверхностей наклона в среднем составляет 8—16°. Развитие оползневого процесса здесь имеет сложный характер. В пределах участка северного крыла складки, расположенного в зонах пересечения разломов, формируются грандиозные блоковые оползни срезания (Пачу, Стерч-Керч) (рис. 3—5).

На элементарных водосборах северного крыла протяженностью до 5 км с площадью до 7,0 км² крутизна склонов в целом совпадает с падением пород. Здесь развиваются протяженные оползни скольжения, переходящие в оползни течения. Одним из факторов такого перехода является крайне сильная расчлененность рельефа с выклиниванием в местах вреза грунтовых вод, что обуславливает механизм «всасывания» в эрозионные промоины сползающих масс (рис. 2).

Современные тектонические движения (СТД) и сейсмичность территории являются важными факторами, определяющими активизацию оползней. Особенно четко это прослеживается на примере Бенойской антиклинали. По результатам повторных геодезических работ скорость современных тектонических движений составляет 4,0—6,0 мм/год.

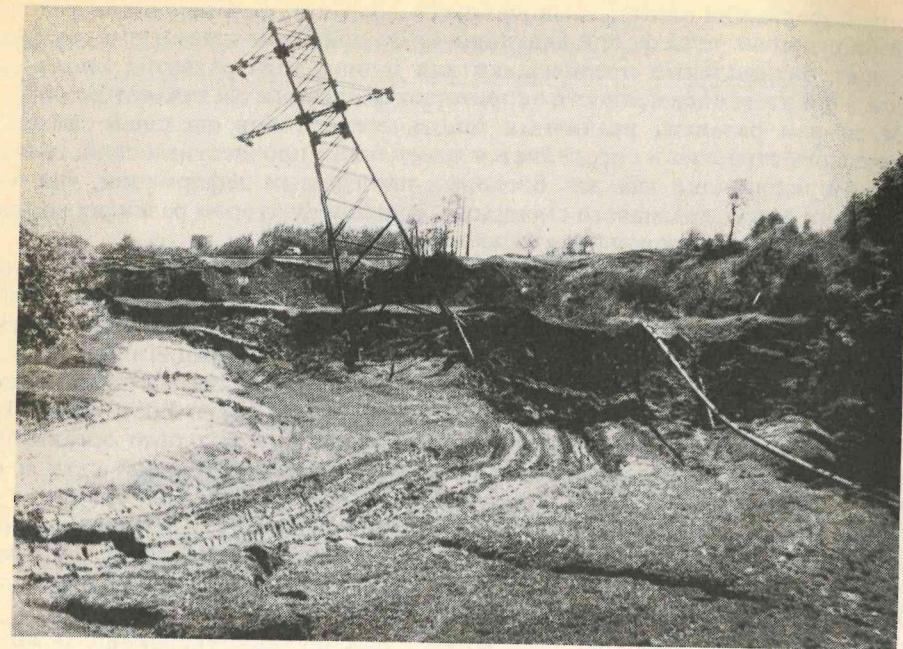


Рис. 5. Фрагмент ступени проседания с поврежденной высоковольтной линией, газопроводом и дорогой в пределах оползня Пачу (структурно-тектонический оползень в приосевой части Бенойской антиклинали)

Фактором подготовки смещения является сейсмичность территории. По результатам анализа проведенных геофизических работ установлена дискретность сейсмической энергии во времени для территории Бенойской антиклинальной зоны. В период с 1985 по 1988 гг. на территории Чечено-Ингушетии зарегистрировано 30 землетрясений с магнитудой более 3. Однако по результатам проведенных геофизических работ была установлена дискретность сейсмической энергии во времени ($\frac{\lg E}{S}$ Дж/км²). Так, в период 1985—1986 гг. существовали минимальные плотности сейсмической активности для исследуемой территории. В период 1987—1989 гг. отмечены максимальные значения плотности сейсмической активности.

Природно-климатические факторы, сыгравшие важнейшую роль в катастрофической оползневой активизации, имели следующие особенности. В период с мая по август 1988 г. выпало более 600 мм осадков, значительная часть которых осталась в массивах горных пород на потенциально оползневых склонах. В январе-феврале 1989 г. выпало аномально высокое количество снега, превысившее среднемноголетнюю норму по посту Ножай-Юрт в 5,5 раза, а по метеопосту Ведено — в 9 раз. С конца февраля и до середины марта произошло резкое таяние снега, которое и явилось спусковым крючком для массовой катастрофической активизации оползней.

Заключение

1. По результатам выполненных исследований установлена тесная функциональная взаимосвязь развития оползневого процесса со структурно-тектоническими условиями территории зоны Бенойского купола. Определенное сочетание тектонического строения с литолого-стратиграфическими комплексами

молассовой формации олигоцен-миоценового возраста, формирующих унаследованный оползневой рельеф, при благоприятных природно-климатических факторах создает оптимальные предпосылки для площадного развития оползневого процесса. При этом пораженность территории оползнями составляет до 60%.

2. Механизм развития различных генетических типов оползней зависит от тектонического строения и определяется изменением прочностных свойств город. Создаются предпосылки как для блоковых оползневых деформаций, так и для пластического типа оползневого смещения. Важным фактором развития оползней является активная эрозионная деятельность водотоков.

3. Существующая система территориального расселения в пределах оползнеопасных территорий Ножай-Юртовского района Чечено-Ингушетии не требует радикального изменения условий застройки. Оптимальными являются деревянные дома с фундаментами, не связанными жесткими конструкциями.

4. Для прогноза угрозы катастрофической активизации оползневого процесса в пределах потенциально оползнеопасных территорий Северо-Восточного Предкавказья и оптимизации хозяйственной деятельности необходимо организовать систему мониторинга, состоящую из подсистемы наблюдательной сети и оперативной автоматизированной обработки информации, подсистемы моделирования, подсистемы прогноза и подсистемы управления. Подсистема наблюдательной сети базируется на результатах регионального, специального и локального режимных наблюдений, что позволяет получить и обработать информацию о состоянии оползнеопасных территорий.

На основании результатов, полученных при функционировании режимной сети, осуществляется построение постоянно действующих моделей геологической среды, на основании чего реализуется прогноз и разрабатываются схемы инженерной защиты территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демчинин М. Г., Краев В. Ф. Динамика склонов территорий, прилегающих к сейсмогенным зонам // Геол. журнал, 1961. № 6. С. 42—48.
2. Рудько Г. И. Инженерно-геологические аспекты управления геологической среды Западного региона Украинской ССР // Инж. геология. 1990. № 6. С. 77—90.

Эколого-геологический центр
ГГП «Западукргеология»,
ГГП «Севкавгеология»

Поступила в редакцию
7.VI.1993

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

3 · 1995

УДК 624.131.1(571.5)

© 1995 г. Б. П. АГАФОНОВ

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДОЛИНЫ р. ВИТИМ В РАЙОНЕ СТВОРА МОКСКОЙ ГЭС

Выявлены экзогенные геологические процессы, осложняющие проектирование и строительство инженерных сооружений. Дендрохронологическим методом восстановлены годы прохождения селей и обрушений курумов с крутых склонов, отмечена связь обрушений курумовых масс с катастрофическими и сильными землетрясениями. Приведена схема распространения экзогенных геологических процессов на исследованной территории.

Геологические и климатические условия

Выбранный створ Мокской ГЭС, называемый Болдыревским, находится в пределах юго-восточных отрогов Южно-Муйского хребта в 3,5 км перед впадением в Витим крупного левого притока — р. Тулдунь (рис. 1). Плотину запланировано возвести между небольшими левыми притоками Витима — Верхним и Нижним Болдыревским. Коренное основание плотины представлено дислоцированными метаморфическими толщами нижнего протерозоя — гнейсами, амфиболитами, мигматитами. Эти толщи имеют субмеридиональное простирание и углы падения 70—80°. Они прорваны гранитами и базит-типербазитовыми интрузиями и рассечены многочисленными тектоническими нарушениями, оперяющими Шаманский глубинный разлом. Абсолютные отметки непосредственно прилегающих к будущей плотине склонов долины 1000—1200 м, относительные превышения над урезом реки — 500—700 м.

Климат района резко континентальный с продолжительной суровой малоснежной зимой, теплым летом с короткими переходными сезонами. Самый холодный месяц — январь. Данные по близлежащим метеостанциям Калакан и Средний Колар приведены в таблице. В любом месяце возможны заморозки. Переход среднесуточной температуры воздуха через 0° происходит в конце апреля — начале мая и в конце октября. Горные породы скованы многолетней мерзлотой. Наибольшее количество осадков приходится на июль, наименьшее — на февраль. Летом в отдельные дни нередко выпадает около 40 мм осадков, абсолютный суточный максимум равен 64 мм (табл.). При таких дождях изредка могут образовываться небольшие локальные срыва рыхлых масс со склонов. Но для обильного насыщения грубосkeletalных склоновых отложений влагой, массового проявления оползней, спльзов и образования мощных глыбовых лавин этого количества осадков, по всей вероятности, недостаточно. Как показали наблюдения в горах Прибайкалья [1], в аналогичных условиях среднегорного рельефа критический момент, соответствующий возникновению склоновых процессов, наступает при выпадении около 100 мм осадков за срок не более суток. Следов снежных лавин непосредственно на участке Болдыревского створа незаметно, что связано с маломощностью снежного покрова (см. табл.). Вместе с тем это район



Рис. 1. Район Болдыревского створа проектируемой Мокской ГЭС на р. Витим: 1 — место-положение Болдыревского створа; 2 — эпицентры сильных землетрясений, одногодичных срывов курумных масс со склонов на участке створа (указаны годы и магнитуды); 3 — населенные пункты с ближайшими к створу метеостанциями

тектонически активный и высоко сейсмичный. По В. П. Солоненко [9], его потенциальная сейсмичность 9 баллов, поэтому есть основания ожидать смещения грунтов на склонах под влиянием сейсмического фактора, тем более, что морфология склонов и некоторые особенности распределения рыхлых масс благоприятствуют развитию сейсмогравитационных процессов.

Особенности морфологии и экзодинамики створового участка

В районе Болдыревского створа четко выражена асимметрия склонов долины р. Витим и в соответствии с этим — асимметрия распределения разрушительных экзогенных процессов (рис. 2). На левом (менее крутом) склоне долины экзогенные процессы не представляют особой опасности для инженерных сооружений. Они выражены в основном курумами в верхней части склона, где крутизна поверхности доходит почти до 30° . Свежих срыва глыбовых масс не встречено. Лишь у подножья крутой части склона вдоль разлома, секущего склон, курумы сливаются в сплошную полосу и наползают на нижерасположенную ступень, образуя валы высотой до 2—2,5 м, шириной до 5 м.

Курумы на склоне могут прийти в движение только в случае резкой подвижки блоков по разлому, при катастрофическом землетрясении или глубокой искусственной подрезки склона. В обычных условиях возможны лишь эпизодические перекатывания отдельных обломков, медленная криогенная десессация. На этой стороне долины опасными для инженерных сооружений могут быть водокаменные сели и бурные паводки по ручьям Нижний и Верхний Болдыревский; следы этих процессов выражены в виде видвинутых в р. Витим свежих конусов выноса, заторов по руслам и ран на деревьях. По спилам деревьев с ранами на берегах ручья Нижний Болдыревский примерно в 1 и 2 км от устья установлено, что сели проходили в 1932 и 1941 гг. Уровень воды в ручье поднимался не менее чем на 1,5 м.

Гораздо более сложная инженерно-геодинамическая обстановка имеет место на противоположном (правом) склоне. Длина его 1175 м, высота 700 м, средняя крутизна около 40° . По линии продольного профиля склон довольно четко подразделяется на четыре инженерно-геодинамические зоны: узкая прибрежная, скалистый уступ, средняя и верхняя. Зоны эти выделяются на фоне общего склона тем, что имеют различные уклоны, неодинаковую мощность рыхлого покрова и устойчивость его к срываем. К тому же с переходом от одной зоны к другой резко меняется характер склоновых процессов.

Станция	Температура воздуха, °C					среднегодовые	
	средняя многолетняя		абсолютная				
	январь	июль	годовая	максимальная (июль)	минимальная (январь)		
Калакан	-35,4	17,2	-7,4	37	-51	369	
Средний Калар	-35,9	15,7	-8,8	36	-52	343	

* Данные за 22 июля 1945 г.

Прибрежная — самая узкая зона шириной около 10—15 м, крутизной 15—20°. В верхней ее части почти везде обнажены отшлифованные эрозией коренные породы, лишь участками заваленные глыбами, вынесенные со склона по руслам временных водотоков. Ближе к реке прибрежная полоса на значительном пространстве прикрыта валунами. Большая часть крупных валунов местного происхождения. Они обрушились со склона и были обработаны во время паводков влекомыми мелкими обломками. В развитии прибрежной зоны важную роль играет частое и высокое колебание уровня р. Витим. По данным гидрометеопостов, паводки в течение лета случаются до 3—8 раз, уровень воды поднимается до 1,6 м. Из-за систематического смачивания водой резко интенсифицировано выветривание горных пород. Экспериментально установлено, что во влажном состоянии горные породы выветриваются в 100—160 раз быстрее, чем в сухом [4, 10]. Вода буквально «сверлит» даже крепкие скальные породы. В местах ее постоянного скопления на плоских глыбах образуются ваннообразные выемки до 10—20 см глубиной и 0,5—1 м в попечнике (рис. 3). Такие выемки встречались на разных участках долины р. Витим. Постепенное увеличение глубины к центру выемок связано с тем, что по мере испарения воды, оставшейся после паводка или дождя, сокращается и зона интенсивного выветривания. Продукты разрушения пород в выемках представлены мелкодресвяными, песчаными и илистыми частицами. Они свободно уносятся из чашеобразных ниш во время бурных паводков и сильных ветров. В зоне систематического смачивания очень четко проявляется избирательная денудация. Трециноватые, интенсивно метаморфизованные биотитовые гнейсы разрушаются намного быстрее, и кварцевые прожилки выступают над их поверхностью.

Интенсивное выветривание в зоне систематического смачивания водой суммируется с механическим воздействием паводков и влекомых ими обломков пород на подстилающую основу. Вследствие энергичного совместного проявления этих процессов выходы скальных пород на берегах отшлифованы и на некоторых участках долины обильно испещрены бороздами шириной от 0,2 до 3—4 мм и глубиной до 1—2 мм. В районе Верхне-Тузалинской шиверы встречались похожие на булыжную мостовую естественные валунные отмостки, поверхность их испещрена бороздами, ориентированными вдоль по течению реки. Непосредственными орудиями обработки скал и валунов служат, вероятно, впаянные во льды обломки горных пород и грубообломочный материал, влекомый бурными паводками. Обработка эта настолько интенсивна, что все валуны в отмостках сверху срезаны почти на половину величины (рис. 4).

Скалистый уступ — сравнительно узкий и крутой элемент склона. Ширина его колеблется от 10 до 100 м, крутизна — от 50 до 70° . Он опирается на прибрежную зону и также развивается в основном под воздействием боковой эрозии бурных паводков р. Витим и усиленного выветривания пород в результате систематического смачивания водой. Скальные массивы выше подрезки боковой эрозией нахо-

Осадки, мм по месяцам:												Суточ- ный макси- мум	Мощность снежного покрова, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
3	2	4	13	28	62	97	87	46	14	8	5	64	21
2	1	3	10	23	61	87	84	48	14	6	4	64	18

дятся в неустойчивом состоянии, особенно в местах интенсивной трещиноватости и совпадения плоскостей трещин с направлением поверхности склона. В таких местах отсыдаются глыбы и мелкие блоки коренных пород, которые обваливаются на прибрежную полосу или непосредственно в р. Витим во время ее высоких уровней. Величина обваливающихся с уступа глыб непосредственно в районе Болдыревского створа различна — 0,1—0,2÷2—3 м в поперечнике. На ступеньках, обусловленных препарировкой разбитых трещинами пород, задерживается обломочный материал и сформированы участки рыхлого покрова, заросшие степной растительностью. Систематическая подрезка боковой эрозией препятствует выполаживанию уступа и подготавливает к обрушению новые массы горных пород. Но этот процесс сравнительно медленный, и готовые к обрушению участки при необходимости могут быть легко обезврежены. Остальные процессы — медленное смещение маломощного рыхлого покрова, поверхностный смыв, линейная эрозия — слабо выражены и не представляют опасности для инженерных сооружений.

Средняя часть склона расположена выше скалистого уступа. Длина ее около 150 м, крутизна 40°, местами 45°. На значительных пространствах она осложнена. Рыхлый покров маломощный — около 1—1,5 м. На залесенных участках мощность рыхлого покрова увеличивается до 1,5—2 м. Здесь на поверхности часто встречаются глыбы, которые могут изредка скатываться. Выражены признаки десерпционного смещения рыхлых отложений: дерновый покров не сомкнут, образована мелкая ступенчатость поверхности, деревья изогнуты в комплевой части. Обломки горных пород ориентированы по направлению движения материала. В целом средняя часть склона устойчива. Оползней, сплызов нет, обвалы одиночных глыб редки. На осложненных участках наблюдается поверхностный смыв и незначительный ветровой снос, не представляющие опасности для инженерных сооружений.

Верхняя часть склона длиной 600—650 м и крутизной 38—40° — наиболее инамиичная и в инженерно-геологическом отношении особо опасная зона. Большая часть ее покрыта глыбовым чехлом или курумом мощностью до 5 м и более. В разрезах видно, что в курумах только верхний слой мощностью до 3 м сложен крупными глыбами от 20 см до 1,5—2 м и очень редко 3—4 м в поперечнике. Ниже увеличивается число более мелких глыб и появляется щебенисто-мелкоземистый заполнитель. Это свидетельствует о вымороаживании и выталкивании крупных глыб к поверхности с одновременным проваливанием более мелких обломков и вымыванием мелкозернистого вещества. Возможно также, что под верхним слоем морозное выветривание грунтов из-за большой их увлажненности более интенсивно и глыбы быстрее разрушаются на мелкие обломки. Многие глыбы в курумах залегают неустойчиво и перекатываются на расположенные ниже участки. Повсеместно происходит массовое медленное смещение глыбового покрова.

Поверхность всего склона рассечена редкими ложбинами глубиной 8—12 м. Ложбины начинаются в верхней зоне, постепенно сужаясь от 200 до 10 м. Благо-

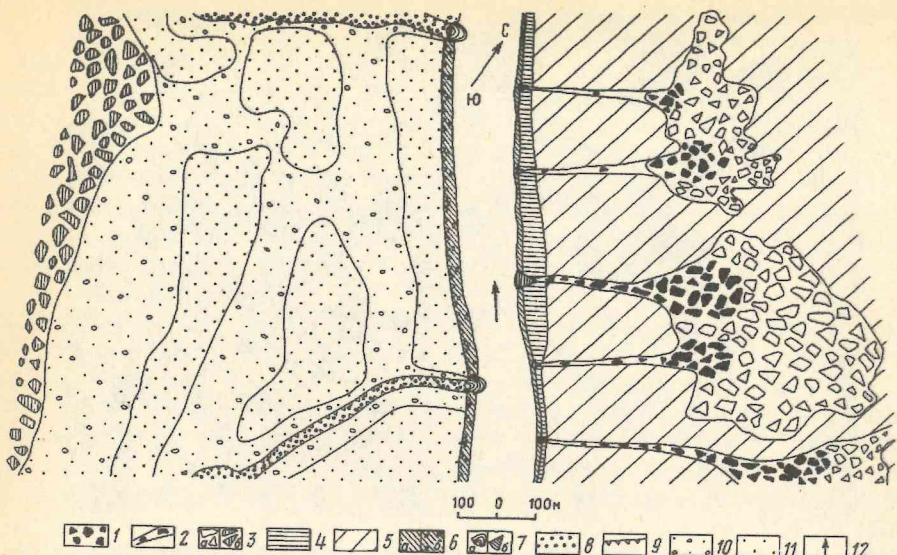


Рис. 2. Схема распространения экзогенных процессов и явлений в долине р. Витим на участке Болдыревского створа Мокской ГЭС: 1 — курумы, подверженные локальным срывам в виде глыбовых лавин, обвалов, перекатывания отдельных глыб, крутизна 36—40°; 2 — перекатывание глыб по ложбинам, эрозия и редкие глыбовые лавины после накопления мощных курумных масс в верховых ложбин, крутизна 36—45°; 3 — курумы, локальные подвижки и перекатывание глыб, криогенная десерпция, крутизна 38—40° (a), и те же процессы, проявляющиеся реже и слабее на склоне крутизной около 30° (b); 4 — отсыданье блоков пород и их обваливание со скалистого уступа крутизной 50—70°, подрезаемого в основании эрозией во время высоких уровней р. Витим; 5 — скатывание одиночных глыб, десерпция, крутизна 38—40°; 6 — прибрежная зона периодического затопления, селективного выветривания, экзарации льдом и влекомыми обломками пород; a — выработанная в коренных породах, б — в рыхлых отложениях; 7 — формирование конусов выноса: а — бурными паводками и водокаменными селями, б — скатывающимися одиночными глыбами, обвалами и глыбовыми лавинами; 8 — водные и редкие вододоломенные потоки, локальные размывы и намывы рыхлых толщ; 9 — размывы и обваливание уступов в рыхлых породах во время бурных паводков; 10 — медленное массовое движение талого слоя (криогенная десерпция), слабо выраженная локальная солифлюкция на поверхности рыхлого покрова, уклоны 10—15°; 11 — эрозия в местах нарушенного дерново-растительного покрова, мерзлотное пучение грунтов (на субгоризонтальных песчано-супесчаных террасах); 12 — направление течения р. Витим

даря такой форме курумовый материал со значительной площади втягивается в ложбины и спускается в нижние части склона. По мере сужения ложбины глыбовые массы концентрируются в узкий поток. Формируются валы напора, где мощность курума увеличивается до 6—7 м, и в случае малейшего нарушения равновесия срываются в виде глыбовых лавин. Обнаружены следы срывов. В центральной ложбине (см. рис. 2) с одного из валов произошел локальный срыв глыбовых масс. Осталась продолговатая ниша срыва глубиной до 1,5—2 м, шириной до 5 м, длиной 15—20 м. На дне ее обнажился глыбовый слой более светлой окраски с обломками 20—30 см в поперечнике. Верхняя сорвавшаяся часть курума состояла из глыб до 1—2 м в поперечнике. Образовавшийся глыбовый поток распространился вниз по ложбине на 100—120 м и отложился при некотором уменьшении уклона днища. Вынесенные глыбы выделяются более светлой окраской. Крутизна днища ложбины, откуда сорвался поток, равна 36°.

Более древние срывы оставили раны на деревьях, сохранившихся по обочинам курумов. Дендрохронологическим анализом семи отобранных срезов-образцов установлено, что в центральной ложбине срывы глыбовых масс происходили в 1725, 1852, 1917, 1938, 1940, 1943, 1948, 1957, 1958, 1968 и 1978 гг. Примечательно, что все известные разрушительные землетрясения с эпицентрами на прилегающей к Болдыревскому створу территории нашли отражение в повреждениях деревьев глыбовыми потоками. Это сейсмические катастрофы 1725 и 1957 гг., сильные землетрясения 1917, 1958, 1968 гг. (рис. 1). В таком совпадении можно



Рис. 3. Ваннообразные углубления на берегах р. Витим, образованные вследствие более интенсивного выветривания горной породы в условиях скопления и застывания влаги в первичных неровностях, а также возможной эрозии при вращении в них воды вместе с обломочным материалом во время бурных паводков

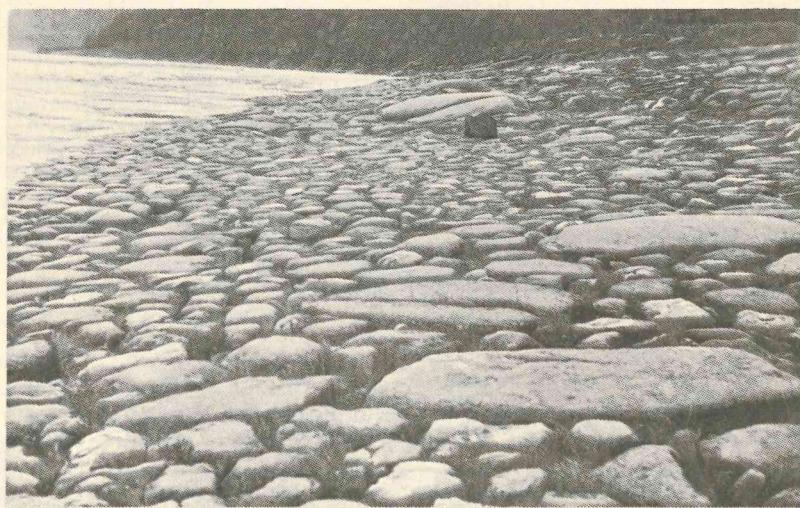


Рис. 4. Выработанная рекой природная валунная «мостовая» на правом берегу р. Витим в районе Верхне-Тузалинской шиверы

усмотреть и элементы случайности, поскольку не все даты повреждений деревьев совпадают с землетрясениями. Но следует учесть, что повреждения деревьев в 1852, 1937, 1940, 1943 и 1948 гг. приходятся на период, когда на рассматриваемой и сопредельной территории инструментальные измерения не проводились; землетрясения силой 6—8 баллов, достаточной для нарушения равновесия наиболее неустойчиво залегающих на склонах глыбовых масс, оставались неизвестными. Поэтому не исключено, что часть повредивших деревья глыбовых потоков перечисленных лет тоже связана с землетрясениями, но они не могли быть отмечены отдаленными сейсмическими станциями.

Эпицентры основной части землетрясений, отразившихся в повреждениях деревьев, находятся в пределах 50 км от места отбора образцов на дендрохронологический анализ; эти землетрясения вполне могли вызвать сорвы неустойчиво залегающих курумовых масс в ложбинах крутого правого склона долины р. Витим в районе выбранного створа. То же можно сказать про землетрясение 1725 г. силой 11 баллов, эпицентр которого находился приблизительно в 175 км от исследуемого склона. Как отметил В. П. Солоненко [8], это было выдающееся сейсмическое событие, охватившее огромную территорию от Нерчинска до Иркутска — более 1000 км от предполагаемого эпицентра, причем от Читы до Селенги (не менее 500 км) отмечались признаки 7—8-балльных макросейсмических эффектов. В створе Мокской ГЭС сотрясение могло превышать 8 баллов (здесь и далее оценено по [7], табл. 19).

Особо следует остановиться на возможной связи срыва курумовых масс в районе створа Мокской ГЭС с землетрясением 29 апреля 1917 г. силой 9 баллов. Эпицентр его, по данным С. И. Голенецкого [5], расположен в 125 км от створа ГЭС. Сотрясение в районе створа могло быть 7—8 баллов, что вполне достаточно для срывов курумовых масс на участке створа с правого крутого склона долины р. Витим.

Эпицентр Муйского катастрофического землетрясения силой 10—11 баллов находится всего лишь в 40 км от Болдыревского створа Мокской ГЭС. В 150 км от эпицентра отмечены 8-балльные эффекты. Район створа находится в зоне 8—9-балльных сотрясений. Сейсмогравитационные осьпи и обвалы наблюдались на расстоянии до 350 км от эпицентра [8, 9]. На крутом склоне у Болдыревского створа они могли образоваться в массовом количестве.

В 1958 г. произошло 8-балльное землетрясение, эпицентр которого находился в 50 км от Болдыревского створа Мокской ГЭС. В том же году были 9-балльные Нюкжинское и Олекминское землетрясения, но эпицентры их находились в 330 км от места наших исследований, поэтому более вероятна связь срыва курумовых масс в 1958 г. с ближним 8-балльным землетрясением. Сотрясаемость от него в районе створа могла достигать 7 баллов.

31 августа 1968 г. в 42 км от Болдыревского створа случилось 7-балльное Усть-Муйское землетрясение, которое могло вызвать глыбовый поток в крутопадающей ложбине на правом склоне долины р. Витим. Курумы к этому времени оттаивают на всю мощность, и достаточно толчка незначительной силы, чтобы наиболее слабо устойчивые участки глыбового чехла пришли в движение. Сотрясаемость участка Болдыревского створа могла достигать 5—6 баллов.

Заключение

Обобщая изложенное, можно заключить, что Болдыревский створ Мокской ГЭС находится в довольно сложных инженерно-геодинамических условиях. Особо опасен для инженерных сооружений правый крутой склон долины, где выявлены следы глыболовинных потоков. Из полученных фактических материалов о проявлении этих потоков весьма интересны даты повреждений деревьев, совпадающие с годами известных сильных и катастрофических землетрясений. Как отмечалось, атмосферные осадки в районе будущей ГЭС выпадают в недостаточно большом количестве, чтобы часто вызывать сорвы рыхлого покрова, зато высокобалльные землетрясения — явление нередкое. Недавно получены данные, что даже сотрясения умеренной силы при благоприятных условиях вызывают довольно существенную активизацию экзогенных процессов. Так, 6-балльными землетрясениями 19 февраля, 22 и 28 мая 1981 г. были вызваны многочисленные обвалы интенсивно трещиноватых пород с береговых обрывов и смещение курума со склона южнее бухты Песчаной на Байкале [3]. По инженерно-геоморфологическим условиям участок смещения курума во многом схож с правым склоном долины р. Витим в районе Болдыревского створа Мокской ГЭС. Значительное пространство верхней половины склона здесь также покрыто глыбовыми россыпями с крутизной поверх-

хности 36—40°. В поле развития этих россыпей сдвинулся курум, залегавший в слабо выраженной ложбине среди светло-хвойного леса. Общая длина сместившегося курума около 230 м, средняя ширина 12 м; мощность сорванного слоя достигает 1—1,5 м. На пути движения курума некоторые молодые деревья вырваны из земли с корнями, а мощные старые расщеплены вонзившимися в стволы глыбами или глубоко поранены до высоты 1,2 м от их основания.

Эти, а также некоторые другие наблюдения [2, 6] показали, что в условиях слабоустойчивого залегания пород «среднебалльные» землетрясения способны вызывать весьма значительный экзогеодинамический эффект. Все это необходимо учитывать при проектировании инженерных сооружений в районе створа Мокской ГЭС, где крутизна склонов и строение рыхлого чехла местами благоприятствуют проявлению подобных процессов. Наиболее динамичные из разрушительных процессов — глыболовинные потоки — в основном концентрируются в неглубоких ложбинах, рассекающих правый склон на всю длину. Для обеспечения безопасности инженерных сооружений Мокской ГЭС эти ложбины можно перегородить каскадом железобетонных плотин, чтобы улавливать срывающиеся глыбовые массы и уменьшить возможность возникновения мощных глыболовинных потоков.

Из других процессов, которые могут осложнить строительство и эксплуатацию инженерных сооружений, следует обратить внимание на водокаменные сели и бурные паводки по распадкам ручьев Нижний и Верхний Болдыревский, где эти явления выражены в виде выдвинутых в р. Витим свежих конусов выноса и ран на деревьях.

Остальные экзогенные процессы в районе Болдыревского створа — скатывание одиночных глыб, криогенная десерпция, линейная эрозия в ложбинах и другие — не представляют опасности для инженерных сооружений, однако в случае глубокой подрезки склонов могут появиться небольшие обвалы, а при уничтожении дерново-растительного покрова — линейная эрозия супесчаных толщ на левобережье р. Витим. При строительстве ГЭС следует иметь в виду возможную активизацию курумов на крутых склонах во время мощных взрывов скальных пород.

Полученные материалы, указывающие на связь некоторых экзогенных процессов с землетрясениями, следует рассматривать как начальное звено в разработке этого интересного, важного в практическом отношении, но слабо изученного вопроса. Для более углубленных и тщательных исследований этой связи желательно создать сеть многолетних экспериментальных полигонов с целью изучения различных видов смещения пород и проводить на них как систематические режимные наблюдения, так и обследования сразу после землетрясений, что позволит выделить сейсмогенную составляющую в подвижках грунтов. На основе получаемых данных представится возможность составить специальные карты затухания сейсмогенной составляющей процессов по мере удаления от эпицентров землетрясений (подобно картам изосейст), которые найдут применение при детальном сейсмическом районировании и оценке устойчивости рыхлых масс на склонах. Опираясь на эти же материалы можно будет разрабатывать методику составления карт районирования территории по степени сейсмогенной активизации экзогенных процессов. Количественные данные, полученные на нарушенных и ненарушенных участках, позволят решать актуальные прогностические инженерно-геологические задачи, связанные с техногенным воздействием на природную среду.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-05-16037а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов Б. П. Сели в Байкальской впадине (распространение, прогноз и влияние на Байкал) // Вод. ресурсы. 1975. № 3. С. 95—109.
2. Агафонов Б. П. Виброэффект и его влияние на экзогенные геологические процессы // Геология и геофизика. 1982. № 4. С. 95—103.
3. Агафонов Б. П. Вековые прогностические полигоны // Геологические и экологические прогнозы. Новосибирск: Наука, 1984. С. 78—82.
4. Войлошников В. А. Выветривание в таежном Приангарье // Региональные типы процессов выветривания. Чита: Читинское книжное издательство, 1970. С. 22—27.
5. Голенецкий С. И. Землетрясения районов трассы БАМ на участке от северной оконечности оз. Байкал до р. Олекмы // Геологические и сейсмические условия района БАМ. Новосибирск: Наука, 1978. С. 126—137.
6. Кочетков В. М. Сильное землетрясение в районе трассы БАМ // Геологические и сейсмические условия района БАМ. Новосибирск: Наука, 1978. С. 187—190.
7. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы. М.: Наука, 1977. 304 с.
8. Солоненко В. П. Сейсмология и сейсмическое районирование трассы БАМ и зоны ее экономического влияния. Новосибирск: Наука, 1979. 68 с.
9. Солоненко В. П. Сейсмический риск ГЭС и прогноз плотинных землетрясений по палеосейсмогеологическим и инженерно-сейсмогеологическим данным // Геология и геофизика. 1982. № 2. С. 118—129.
10. Суходровский В. П. Рельефообразование в перегляциальных условиях (на примере Земли Франца-Иосифа). М.: Наука, 1967. 119 с.

Ин-т земной коры
СО РАН

Поступила в редакцию
29.I.1994

УДК 624.131.3

© 1995 г. Ш. Ш. ЗАГИРОВ

О СОПОСТАВИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Рассмотрены математические методы сопоставления результатов определения модуля деформации при штамповках и в компрессионных испытаниях, в том числе для неоднородных толщ.

Для получения инженерно-геологической информации при проектировании сооружений используется комплекс прямых и косвенных методов. Это связано как с невозможностью получения необходимой информации одним методом, так и с желанием максимально использовать данные различных методов при обобщении полученных материалов. Точность и стоимость определений отдельными методами, а также исследуемые характеристики различны. Принято считать, что использование нескольких методов повышает качество и количество получаемой информации путем выявления различных физических особенностей грунтов.

Если физические характеристики в основном определяются лабораторными методами, то при оценке деформируемости в качестве эталонного метода принято использовать штамповочные испытания, а при исследовании прочностных свойств — испытания на срез целика грунта [4]. Параметры, получаемые другими методами, должны быть приведены в соответствие с данными указанных методов. С этой целью выполняются параллельные испытания эталонным методом (обязательно для сооружений 1-го класса и во многих случаях для 2-го класса [4]) или же используются корректирующие коэффициенты и таблицы данных, полученные для однотипных грунтов путем совместной статистической обработки результатов испытаний.

В целом такой подход к получению инженерно-геологической информации не вызывает возражений с точки зрения ускорения и удешевления исследований. Однако при этом должны быть учтены граничные условия различных экспериментов (особенности отдельных методов, область воздействия эксперимента), физическая сущность характеристик, определяемых различными методами, а при обработке результатов — обоснованы соответствующие статистические методы. При выборе последних важное значение будет иметь изменчивость характеристик грунтов и особенности строения исследуемой толщи.

Необходимость учета указанных факторов наглядно видна при сопоставлении результатов штамповочных и компрессионных испытаний. Действительно, ввиду сложности и трудоемкости организации штамповочных испытаний в массовом строительстве при необходимости оценки неоднородности оснований часто используются компрессионные исследования в лабораторных условиях, дающие заниженные результаты. Для корректировки полученных при этом характеристик параллельно проводятся штамповочные испытания. При проектировании зданий 3-го класса допускается корректировка данных, полученных в лабораторных условиях, с помощью эмпирических коэффициентов [4], которые установлены путем статистической обработки и результатов параллельных испытаний однотипных грунтов.

Подобное обобщение стало традиционным, хотя данные, полученные двумя

этими методами различаются по физической сущности. Принципиальное различие состоит в особенностях сжатия грунта под штампом и в компрессионном приборе.

Результаты штамповочных испытаний являются интегральными характеристиками и отражают деформируемость грунта не в точке, а в пределах активной зоны сжатия. Размеры этой зоны могут достигать нескольких метров и зависят от площади штампа и интенсивности давления. Под штампом грунтовая толща испытывает неоднородное напряженное состояние, следствием которого является неоднородность деформирования толщи по глубине. В пределы зоны сжатия могут попасть различные слои грунтов, отличающиеся по деформируемости, или может иметь место начальная непрерывная изменчивость деформируемости.

При лабораторных исследованиях образцы воспринимают фиксированные постоянные напряжения без возможности бокового расширения, поэтому данные компрессионных испытаний содержат методические погрешности по отношению к штамповым.

Методическая погрешность может быть описана и количественно оценена на основе математической модели измерительной процедуры [3].

Модуль деформации по данным штамповочных испытаний рассчитывается по формуле [6]

$$E_w = \frac{(1 - v^2) \omega dP}{S_w}, \quad (1)$$

где v — коэффициент поперечной деформации, равный для песков и супесей 0,27, для суглинков 0,35, для глин 0,42; ω — безразмерный коэффициент, равный для круглого штампа 0,79; d — диаметр штампа; P — давление под штампом; S_w — осадка штампа, соответствующая давлению P .

Модуль деформации по данным компрессионных испытаний равен [7]

$$E_k = \frac{\beta h P}{S_k}, \quad (2)$$

где β — коэффициент, равный для песков и супесей 0,74, для суглинков 0,62, для глин 0,42; h — начальная высота образца; P — давление на образец; S_k — осадка образца, соответствующая давлению P .

Отношение модулей деформации, рассчитанных по данным штамповочных и компрессионных испытаний, равно

$$m_k = \frac{E_w}{E_k} = \frac{(1 - v^2) \omega d S_k}{\beta h S_w}. \quad (3)$$

При площади подошвы штампа 5000 см^2 и высоте кольца компрессионного прибора 2,5 см корректирующий коэффициент по выражению (3) m_k для песков и супесей равен $31,1 S_k / S_w$, для суглинков — $36,3 S_k / S_w$, для глин — $52,5 S_k / S_w$. По данным табл. 22 [4] при коэффициенте пористости $e = 0,65$ корректирующий коэффициент равен: для супесей — 3,5, для суглинков — 4,5, для глин — 6. При этом имеем для супесей $S_w = 8,86 S_k$, для суглинков $S_w = 8,07 S_k$ и для глин $S_w = 8,75 S_k$, т. е. соотношение между осадками штампа и компрессии в данном случае практически (в пределах имеющей место точности) не зависит от вида грунта.

С учетом формы штампа выражение (3) можно представить в виде

$$m_k = \frac{h_3 S_k}{h S_w}, \quad (4)$$

где h_3 — мощность эквивалентного слоя, равная $h_3 = A \omega_{kb} b$, причем $A \omega_{kb}$ —

табличный коэффициент [7], $A = (1-v^2)/\beta$, b — ширина подошвы квадратного штампа, эквивалентного по площади подошвы круглому штампу.

Учитывая, что мощность сжимаемой толщи под штампом $H = 2h$, имеем

$$m_k = \frac{HS_k}{2hS_w}. \quad (5)$$

Отсюда корректирующий коэффициент m_k равен половине отношения относительных осадок компрессии ε_k и штампа ε_w :

$$m_k = 0,5\varepsilon_k/\varepsilon_w. \quad (6)$$

Из (6) видно, что относительная осадка штампа во много раз меньше относительной осадки компрессии. По-видимому, причиной этого является различие мощности сжимаемой толщи под штампом и толщины образца при компрессии, а также отличие характера распределения напряжений в этих слоях.

По данным табл. 22 в [4, стр. 33] значения m_k уменьшаются с увеличением коэффициента пористости грунта. Следовательно, модули деформации по данным компрессионных и штамповых испытаний в среднем более близки между собой для слабых грунтов и их различие растет с упрочнением грунтов. Это означает, что погрешность определения модуля деформации по компрессионным данным следует считать мультипликативной, т. е. зависящей от величины модуля деформации конкретного грунта и увеличивающейся с возрастанием его значений.

Относительная близость значений модулей деформации по данным этих методов в случае слабых грунтов связана с тем, что корректирующие коэффициенты (табл. 22 [4]) получены для интервала давления 0,1—0,2 МПа. Хотя под штампом давление с глубиной падает, слабые грунты достаточно деформируются при неизначительных давлениях, в связи с чем осадка штампа S_w увеличивается и модуль деформации по этим данным становится несколько ближе к значениям, полученным по результатам компрессионных испытаний.

Возможность сопоставления модулей деформации, полученных лабораторными и полевыми методами, в случае неоднородных толщ грунтов весьма проблематична. Здесь важное значение приобретают слоистость, непрерывная изменчивость характеристик грунтов и т. д. Эти факторы необходимо учитывать также при определении модуля деформации по данным зондирования, так как непрерывная изменчивость и слоистость будут сказываться на величине сопротивления зондированию.

При сравнении значений модуля деформации по данным компрессионных и штамповых испытаний коэффициент m_k определяется путем их совместной статистической обработки для отдельных видов грунтов в фиксированных интервалах изменения давления и коэффициента пористости. Компрессионные испытания проводятся на образцах, отобранных с различных глубин, при фиксированном интервале изменения давления. Это обстоятельство исключает влияние напряженного состояния на значения модуля деформации. Напряжения под штампом отличаются от воспринимаемых образцами в компрессионных приборах. Если по данным компрессии модуль деформации рассчитать для интервалов давлений, соответствующих напряжениям под штампом на данной глубине, то может иметь место непрерывная изменчивость модуля деформации по глубине. Если же модуль деформации не определять при давлениях, соответствующих их значениям под штампом на данной глубине, то получатся результаты, рассчитанные при различных напряженных состояниях, т. е. содержащие методическую погрешность.

Непрерывная изменчивость, обусловленная как неоднородностью напряженного состояния, так и природными факторами, связанными с особенностями исследуемой толщи, сказывается на моментах закона распределения модуля де-

формации. Кроме того, при определении моментов закона распределения модуля деформации осреднением без учета изменчивости их значения будут зависеть от детальности опробования по глубине. Например, при увеличении модуля деформации с глубиной и сосредоточения точек опробования в верхней части основания среднее значение будет меньше фактического. Если же большее количество точек опробования сосредоточить в нижней части, то среднее значение будет больше фактического.

Если законы распределения модуля деформации, рассчитанного с учетом его изменчивости и обычным осреднением, будут отличаться статистически несущественно, то корректирующий коэффициент можно установить по принятому на практике методу.

При наличии непрерывной изменчивости g -й момент закона распределения с учетом влияния размера области обобщения можно определить из выражения

$$M_g = \frac{1}{\beta - \alpha} \int_a^\beta [E(z)]^g dz, \quad (7)$$

где $(\beta - \alpha)$ — размер обобщаемой области; $E(z)$ — функция, описывающая изменение модуля деформации.

При известных первых четырех моментах плотность и функция закона распределения восстанавливаются при помощи ряда Шарлье [1]:

$$\int [E] = \frac{1}{6} \varphi_0(z) - \frac{1}{6} \frac{M_3}{\sigma^3} \varphi_0^{(3)}(z) + \frac{1}{24} \left[\frac{M_3}{\sigma^4} - 3 \right] \varphi_0^{(4)}(z), \quad (8)$$

где M_3 и M_4 — соответственно третий и четвертый центральные моменты; σ — среднее квадратическое отклонение; $z = \frac{\sigma - M_1}{\sigma}$, где M_1 — первый начальный момент; $\varphi_0(z)$, $\varphi_0^{(3)}(z)$, $\varphi_0^{(4)}(z)$ — табличные коэффициенты [1];

$$F[E] = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \Phi(z) - \frac{1}{6} \frac{M_3}{\sigma^3} \varphi_0^{(2)}(z) + \frac{1}{24} \left(\frac{M_4}{\sigma^4} - 3 \right) \varphi_0^{(3)}(z), \quad (9)$$

где $\varphi_0^{(2)}(z)$ — табличный коэффициент [1,5].

Допустим, что изменение модуля деформации по глубине описывается полиномом второй степени

$$E(z) = C_0 + C_1 z + C_2 z^2 + \delta, \quad (10)$$

где δ — нормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией s^2 , C_i — коэффициенты полинома.

При ограниченном объеме информации значения моментов высоких порядков будут содержать погрешности, поэтому приведем выражения для определения первых двух моментов (выражения для определения моментов более высоких порядков приведены в [2]).

Первый начальный M_1 и второй центральный момент M_2 определяются из выражений [2]

$$M_1 = C_0 + 0,5 [C_1 + 0,5C_2(\alpha + \beta)] (\alpha + \beta) + \frac{C_2}{12} (\beta - \alpha)^2, \quad (11)$$

$$M_2 = \frac{(\beta - \alpha)^2}{4} \left[\frac{1}{3} [C_1 + C_2(\alpha + \beta)]^2 + \frac{C_2^2}{20} (\beta - \alpha)^2 \right]. \quad (12)$$

Общая дисперсия будет равна

$$\sigma^2 = M_2 + s^2, \quad (13)$$

где s^2 — дисперсия, обусловленная случайными отклонениями.

Из выражения (12) видно, что степень влияния непрерывной изменчивости на стандарт возрастает с увеличением мощности области обобщения, а также значений коэффициентов полинома C_1 и C_2 . К особенно быстрому возрастанию приводит увеличение значения коэффициента C_2 .

Сравнение средних значений и дисперсий модуля деформации по данным компрессионных испытаний, рассчитанных осреднением и по выражениям (11) и (13), можно производить при помощи критериев Стьюдента и Фишера [5]. Если по обоим критериям различие статистически несущественно, то обработку данных можно производить обычным осреднением. В случае существенного различия необходимо, пользуясь соотношениями (11) и (12), рассчитать средние значения и дисперсии модуля деформации по каждой выборке и при определении корректирующих коэффициентов использовать полученные значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаев М. Н., Михеев В. В. Надежность оснований сооружений. Л.: 1976. 151 с.
2. Загиров Ш. Ш. Оптимизация инженерно-геологических изысканий оснований сооружений. М.: Изд-во ВЗПИ, 1990. 346 с.
3. Новицкий П. В., Заграф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. М.: Энергоатомиздат, 1991. 302 с.
4. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1986. 415 с.
5. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики (для технических приложений). М.: 1969. 505 с.
6. Справочник проектировщика. Основания и фундаменты. М.: Стройиздат, 1985. 479 с.
7. Цытович Н. А. Механика грунтов. М.: Выш. шк., 1979. 272 с.

Дагестанский политехнический
институт

Поступила в редакцию
18.III.1993

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология

3 · 1995

УДК 624.131

© 1995 г. Р. С. ЗИАНГИРОВ, В. Т. ТРОФИМОВ

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ОБЩЕЙ КЛАССИФИКАЦИИ ГРУНТОВ

(к пересмотру ГОСТа 25100-82. Грунты. Классификация)

Предлагается классификация грунтов, состоящая из общей классификации и набора частных классификаций. Общая классификация включает подмножество грунтов как природных образований: классы скальные и полускальные, дисперсные, мерзлые, и подмножество — класс техногенных грунтов. Общая классификация доведена до видов грунтов в пространстве параметров вещественного состава, структуры и текстуры. Частные классификации выделяют разновидности грунтов по их свойствам при взаимодействии с различными внешними факторами, а также по некоторым параметрам состава, важным при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений (засоленность, льдистость и др.), включая и экологические аспекты (токсичность, радиоактивность и др.). Деление техногенных грунтов произведено по генетическим признакам, а также по параметрам состава, структуры, текстуры и свойств.

После выхода ГОСТа 25100-82 прошло 12 лет, и следует проанализировать опыт его применения, отметить положительные и отрицательные аспекты. Напомним, что в его основу были положены общие инженерно-геологические классификации горных пород, предложенные Е. М. Сергеевым с соавторами [8] и Е. М. Сергеевым [3]. В них были отражены генезис, состав и особенности строения пород, доведенные до выделения типов. В ГОСТе 25100-82 была закреплена классификация грунтов для целей строительства, доведенная до выделения видов и разновидностей грунтов. При этом разновидности грунтов выделяли по количественным характеристикам состава, свойств и температуры грунтов.

Принятие ГОСТа 25100-82 сыграло положительную роль в лучшем взаимопонимании специалистов различного профиля — изыскателей, проектировщиков, строителей — и способствовало повышению качества инженерных изысканий и проектирования. Однако опыт применения ГОСТа 25100-82 показал и наличие определенных его недостатков. Классификация оказалась достаточно сложной, в ней не был отражен экологический аспект техногенных образований. Большая группа грунтов, территориально занимающая почти 65% территории России, — мерзлые грунты — классифицировалась на уровне разновидностей. Не было четкого подразделения на грунты и слагаемые ими массивы.

Общая классификация объектов в любой науке всегда актуальна. Обстоятельный анализ основных подходов к построению общих классификаций геологических объектов для инженерно-геологических целей и их анализ выполнены Г. К. Бондариком [1]. Им еще раз четко подчеркнуто, что общая классификация грунтов должна перечислить все множество объектов, используемых как основание, среда или материал сооружений, на основе иерархической системы объективно оцениваемых признаков грунтов. Общая классификация грунтов позволяет разрабатывать частные классификации разных типов грунтов для использования на практике.

Наиболее известные классификации горных пород в инженерно-гео-

Таблица I

Грунты: классификация

ГЛАВА VI

Класс	Группа	Подгруппа	Тип	Вид	Разновидности
Скальные (с жесткими структур- ными связями — кристалли- ционными и цемента- ционными	Скальные	Магматические: интрузивные	Силикатные ультраосновного состава основного состава среднего состава кислого состава	Перidotиты, дуниты, пироксениты Габбро, нориты, анортозиты, диабазы, диаба- зовые порфириты, долериты Диориты, спениты, порфириты, ортоклазовые порфириты Граниты, гранодиориты, кварцевые, спениты, диориты, кварцевые порфириты, кварцевые порфириты Базальты, долериты Андезиты, вулканогенно-обломочные грунты, обсидианы, трахиты Липариты, дациты, риолиты	Выделяются по: коэффициенту вывре- ности степени размягчаемости в воде температурае грунта степени водопроница- емости степени засоленности структуре и текстуре
		Эффузивные	Основного состава Среднего состава Кислого состава		
		Метаморфи- ческие Осадочные	Силикатные Карбонатные Железистые Силикатные Карбонатные Силикатные	Гнейсы, сланцы, кварциты Мраморы, роговики, скарны Железные руды Песчаники, конгломераты, брекции, туфиты Известняки *, доломиты Вулканогенно-обломочные грунты *	
Полускальные	Осадочные				Артиллиты, алевролиты, песчаники Ополки, трепела, диатомиты * Мела, мергели, известняки * Гипсы, ангидриты

P 4

ΓΕΩΓΑΓΕΝΗ ΜΙΧΑΗΛΟΥ

Грунты: классификация

Таблица 3

Грунты: классификация
III. Класс природных мерзлых грунтов

Класс	Группа	Подгруппа	Тип	Вид	Разновидности	
Мерзлые (грунты с криогенными структурными связями)	Скальные	Промерзшие: интрузивные эффузивные метаморфические осадочные	Ледяные Минеральные	Все виды скользких грунтов	Выделяются по: степени морозной пучинистости льдистости за счет видимых ледяных включений температурно- прочностным свойствам степени засоленности текстуре	
	Полускальные	эффузивные осадочные	Ледяные минеральные Ледяные органо- минеральные Ледяные органические	Все виды дисперсных грунтов		
	Ледяные	Конституционные (внутргрунтовые)	Лед	Лед сегрегационный Лед инъекционный Лед ледниковый Лед наледный Лед речной, озерный, морской, донный Лед инфильтра- ционный (снежный) Лед жильный Лед повторно- жильный Лед пещерный		

логических целях можно разбить на три группы. В первую из них входят классификации, предложенные Ф. П. Саваренским (1937) [7], Н. Н. Масловым (1944) [6], В. Д. Ломтадзе (1970) [4], во вторую — классификации, предложенные Е. М. Сергеевым соавторами (1956) [8], Е. М. Сергеевым (1971, 1985) [3, 9], а также классификация грунтов, закрепленная в ГОСТе 25100-82. В третью группу входит общая классификация, предложенная Г. К. Бондариком (1981) [2]. Отдельно стоят специальные классификации техногенных грунтов (Ю. М. Лычко, 1983 [5], А. П. Афонин и др., 1990 [1]). Все классификации имеют как положительные, так и отрицательные стороны. Постараемся отметить основные их особенности, которые целесообразно закрепить и использовать при разработке новой классификации¹, которая может лечь в основу пересматриваемого ГОСТа 25100-82.

Объектом классификации являются грунты. Грунт — это любая горная порода, осадок, почва и техногенные геологические образования, представляющие собой многокомпонентные системы, используемые в строительстве как основание фундаментов зданий и сооружений, среда для их размещения или материал для их возведения. Данное определение грунта предполагает необходимость

¹ При разработке классификации использованы пожелания и рекомендации Г. К. Бондарика. Классификация мерзлых грунтов выполнена совместно с Г. И. Дубиковым, а техногенных — совместно с А. П. Афониным.

Грунты: классификация
IV. Класс техногенных грунтов (скольких, дисперсных и мерзлых)*

Класс	Группа	Подгруппа	Тип	Вид
Скальные	Скальные	Природные образования, измененные в условиях естественного залегания измененные физическим воздействием измененные физико-химическим воздействием	Все типы природных скальных грунтов	Все виды природных скальных грунтов
	Дисперсные	Связные	Природные образования, измененные в условиях естественного залегания измененные физическим воздействием измененные физико-химическим воздействием	Все виды природных дисперсных грунтов
		Несвязные	Природные перемещенные образования насыпные намывные образованные взрывом	Все типы природных дисперсных и скальных грунтов
	Мерзлые	Антропогенные образования насыпные намывные	Отходы производственной и хозяйственной деятельности	Отходы бытовые, промышленные, строительные, шлаки, шламы, золошлаки и др.
		Скальные	Природные образования, измененные в условиях естественного залегания измененные физическим (тепловым) воздействием измененные химико-физическим воздействием	Все типы природных мерзлых грунтов
	Связные	Природные образования, измененные в условиях естественного залегания измененные физическим (тепловым) воздействием измененные химико-физическим воздействием	Все типы природных мерзлых грунтов	Все виды природных дисперсных грунтов
		Несвязные	измененные физическим (тепловым) или физико-химическим воздействием Природные перемещенные образования насыпные намывные	Оходы бытовые, промышленные, строительные, шлаки, шламы, золошлаки, искусственные льды и др.
		Антропогенные образования насыпные намывные намороженные		

* Разновидности выделяются как соответствующие классам природных грунтов, а также с учетом специфических особенностей и свойств техногенных грунтов.

объединения в одной классификации как природных образований (горная порода, осадок, почва), так и искусственных (техногенных).

Целесообразно различать классификации грунтов-образцов и грунтов-массивов. При построении первых необходимо рассматривать пространство признаков, характеризующих образец грунта. Среди них важнейшими являются вещественный состав, структура и текстура (внутренние факторы как продукт литогенеза, включая влияние современных гипергенных процессов и процессов техногенеза), а также способность грунтов реагировать на внешние воздействия (давление, температуру, изменения термовлажностного режима, биогеохимические воздействия). Рассмотрение грунтов в качестве образцов не требует учета генезиса в прямом виде, тогда как в основе классификации грунтов-массивов (геологические тела, геосистемы) генетический фактор должен считаться важнейшим.

Естественно, в общей классификации грунтов-образцов из множества грунтов необходимо выделить в первую очередь такие их особенности состава, структуры и текстуры, которые контролируют в самом общем виде их поведение (свойства) при внешних воздействиях. Эти признаки должны, как это принято в грунтоведении, ставить в соответствие конкретному грунту некоторую механическую модель — упругое, упругопластичное или пластичное тело. В свою очередь поведение тела под нагрузкой, при изменении температуры, в различных физико-химических условиях зависит от характера и силы связей между структурными элементами и плотности их упаковки. Вещественный состав отдельных структурных элементов и материала, формирующего структурные мостики (связи), также контролирует их свойства (через структуру) и, что очень важно, изменение свойств грунтов при различных внешних воздействиях во времени.

В связи с этим первоначальное расчленение множества грунтов на подмножества в большинстве классификаций проводится по характеру структурных связей. Это позволяет выделить три класса грунтов: 1) грунты с жесткими структурными связями — скальные и полускальные грунты; 2) грунты с преобладанием водно-коллоидных (коагуляционных) и механических структурных связей — дисперсные грунты (грубообломочные, песчаные, пылеватые, глинистые); 3) грунты с криогенными структурными связями — мерзлые (многолетнемерзлые) скальные и дисперсные грунты. Если в первых двух классах связь между структурными элементами реализуется либо при непосредственном контакте структурных элементов, либо через цементирующие или склеивающие вещества, то в 3-м классе мерзлых грунтов, которые существуют только при отрицательных температурах (точнее, при температурах ниже замерзания поровой воды — жидкой компоненты грунтов), связи представлены льдом (замерзшей водой) (табл. 1—3).

Все выделенные три класса грунтов являются природными образованиями. Наряду с подмножеством (классами) грунтов — природных образований, учитывая их широкое распространение и главным образом особенности их вещественного состава, следует выделить подмножество грунтов искусственных — техногенные образования. Деление техногенных образований в принципе может быть проведено также по характеру структурных связей на три класса. Но учитывая слабую разработанность такой классификации, на первом этапе все подмножество техногенных грунтов в обсуждаемом варианте предлагается подразделить на более мелкие подмножества по способу создания и вещественному составу (табл. 4).

В предлагаемой общей классификации грунтов-образцов сохранена иерархическая последовательность деления: класс, группа (подгруппа), тип (подтип), вид, разновидность. Все они выделяются по наиболее существенному признаку или небольшому набору признаков, контролирующих поведение грунтов при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. Так, классы грунтов выделены по характеру структурных связей, группы — по вещественному составу, типы — по петрографическому или литологическому составу, виды — по структурно-текстурным особенностям, а разновидности грунтов — главным обра-

зом по свойствам, а также вещественному составу некоторых компонент грунта и температуре.

Таким образом, по существу, предлагаются общая классификация грунтов и совокупность частных классификаций, позволяющих подразделять виды различных грунтов в пространстве параметров вещественного состава, структуры и текстуры на разновидности грунтов по их свойствам при взаимодействии с различными внешними факторами, а также по некоторым параметрам состава, важным при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений (засоленность, льдистость, включая и экологические аспекты, например токсичность, радиоактивность и др.).

Выделение разновидностей грунтов целесообразно проводить в пределах частных классификаций, различных для разных классов грунтов. Так, для класса скальных и полускальных грунтов целесообразно осуществлять классифицирование по величине прочности на одноосное сжатие и разрыв (растяжение), для дисперсных грунтов — по гранулометрическому составу и пористости, а для вечномерзлых грунтов — по льдистости и т. д. Выделение разновидностей грунтов по этим классификациям не исключает применения других, более специализированных классификаций по тому или иному показателю, например по токсичности для искусственных грунтов и т. п.

Таким образом, классификация грунтов (образцов) должна состоять из двух блоков. В первом (общем) блоке выделяются классы, группы, типы и виды грунтов по вещественному, петрографическому (или литологическому) составу и структурно-текстурным особенностям, а во втором (частном) блоке выделяются разновидности грунтов по количественным параметрам, характеризующим их свойства и некоторые компоненты состава, важные для того или иного вида строительства зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афонин А. П., Дудлер И. В., Зиангиров Р. С. и др. Классификация техногенных грунтов//Инж. геология. 1990. № 1. С. 115—121.
2. Бондарик Г. К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М.: Недра, 1981. 256 с.
3. Грунтоведение/Под ред. Е. М. Сергеева. 3-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1971. 595 с.
4. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология. Л.: Недра, 1970. 528 с.
5. Лычко Ю. М. Инженерно-геологическая характеристика некоторых типов техногенных грунтов//Инж. геология. 1983. № 1. С. 28—36.
6. Маслов Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. М.: Изд. Мин-ва автомат., трансп. и шоссейных дорог РСФСР, 1961.
7. Саваренский Ф. П. Инженерная геология. Изд. 2-е М.: ГОНТИ, 1939.
8. Сергеев Е. М., Приклонский В. А., Панюков П. Н., Белый Л. Д. Общая инженерно-геологическая классификация горных пород и почв//Тр. совещ. по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. Т. 2. М., 1957.
9. Теоретические основы инженерной геологии. Геологические основы/Под ред. Е. М. Сергеева. М.: Недра, 1985. 332 с.

ПНИИИС
МГУ

Поступила в редакцию
15.XII.1993

НАУЧНЫЙ СЕМИНАР «ЭКОЛОГИЯ ВОЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ»

17 ноября 1994 г. состоялся организованный Инженерно-геологическим и геоэкологическим научным центром Российской академии наук семинар «Экология военных территорий». Непосредственным организатором семинара была лаборатория гидрогеологии ИГЦ РАН (руководитель лаборатории профессор В. М. Гольдберг).

В работе семинара помимо сотрудников ИГЦ РАН приняли участие специалисты экологических служб Минобороны РФ, Минприроды РФ, Института водных проблем РАН, Института микробиологии РАН, НГИЦ РАН, Проблемной лаборатории охраны геологической среды МГУ, Международной организации «Экология человека» и др.

На семинаре было заслушано 5 докладов, в обсуждении выступили 7 человек.

По результатам семинара было принято решение, в котором отмечается следующее.

1. Целесообразность публикации заслуженных докладов в журнале «Геоэкология», систематического проведения семинаров, посвященных вопросам военной экологии.

2. Необходимость развития нормативно-методических документов для экологических служб Минобороны РФ. Как показал опыт экологических работ на бывших советских воинских объектах за рубежом, одним из основных видов нарушений природной среды является загрязнение подземных вод и грунтов нефтепродуктами. Подземные воды являются важнейшим источником питьевого водоснабжения, их охрана имеет государственное значение. Вопросы охраны подземных вод от загрязнения нефтепродуктами, контроля за их состоянием имеют свою специфику, которую должны знать работники экологических служб Минобороны РФ, особенно связанных с хранением и использованием нефтепродуктов в военных целях. Вместе с тем отсутствует соответствующий методический документ. Поэтому ИГЦ РАН считает актуальным и необходимым подготовку практического методического пособия по охране подземных вод от загрязнения нефтепродуктами на воинских объектах службы тыла и других видов войск Минобороны РФ.

3. Следует предусмотреть создание на наиболее «тяжелых» в экологическом отношении воинских объектах (аэродромах, танкоромах, складах ГСМ и др.) наблюдательных скважин для контроля за состоянием подземных вод.

4. Необходимо усилить экологическое просвещение военнослужащих, особенно занятых природоохранной деятельностью и контролем за обеспечением экологической безопасности воинских территорий.

На семинаре поднимались вопросы создания опытных экологических полигонов на базе отдельных воинских объектов с наибольшими потерями нефтепродуктов, разработки экологических программ для военных территорий, классификации военных объектов по степени их техногенной нагрузки на природную среду и др.

В. М. Гольдберг.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
академик РАН
В. И. ОСИПОВ

Доктор технических наук
Г. А. МАРКОВ

Зам. главного редактора
доктор геолого-минералогических наук
А. А. ВАРГА

Доктор геолого-минералогических наук
И. П. ЗЕЛИНСКИЙ

Ответственный секретарь
кандидат геолого-минералогических наук
Н. А. РУМЯНЦЕВА

Доктор наук,
Геологическая служба ФРГ
М. ЛАНГЕР

Доктор наук,
Горно-геологическая академия (Болгария)
К. АНГЕЛОВ

Член-корреспондент РАН
В. А. МИРОНЕНКО

Доктор геолого-минералогических наук
В. В. БАУЛИН

Доктор геолого-минералогических наук
И. А. ПАРАБУЧЕВ

Доктор геолого-минералогических наук
С. Д. ВОРОНКЕВИЧ

Доктор геолого-минералогических наук
Е. М. ПАШКИН

Доктор наук,
геологический институт АН Китая
ВАН-СЫ ЦЗИНЬ

Член-корреспондент РАН
Е. В. ПИННЕКЕР

Доктор наук, Ливерпульская лаборатория
Калифорнийского университета (США)
П. ВИТЕРСПУН

Академик РАН
Е. М. СЕРГЕЕВ

Доктор наук, Карлтонский университет
(Канада)
П. ВИЛЬЯМС

Доктор наук, Институт низких температур
университета Хокайдо (Япония)
М. ФУКУДА

Доктор геолого-минералогических наук
Э. Д. ЕРШОВ

Доктор геолого-минералогических наук
В. М. ШВЕЦ

Адрес редакции:

103717 Москва, Подсосенский пер., 21

Телефон: 916-23-18

Заведующая редакцией А. А. Мазаева

Технический редактор Н. И. Демидова

Сдано в набор 24.02.95 Подписано к печати 27.03.95 Формат бумаги 70 × 100¹/₁₆
Офсетная печать Усл. печ. л. 9,1 Усл. кр.-отт. 6,6 тыс. Уч.-изд. л. 11,1 Бум. л. 3,5
Тираж 702 экз. Зак. 2374

Адрес редакции: 103717 Москва, Подсосенский пер., 21, тел. 916-23-18
Московская типография № 2 РАН 121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 6

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Издательство "Наука" РАН
обращает ваше внимание на следующие книги:

Геология и генезис месторождений платиновых металлов. – М.:
"Наука – Геология". 1994. – 22,7 л. (о)

Книга охватывает широкий круг вопросов по теме на примере
практически всех основных регионов России.

Памяти первых российских биогеохимиков. – М.: "Наука – Гео-
логия". 1994. – 15,7 л. (о)

Книга посвящена памяти В.А. Зильберминца, Б.К. Бруновского,
А.М. Симорина, Л.С. Селиванова, А.А. Кирсанова – учеников и кол-
лег В.И. Вернадского.

**Стратиграфический словарь. Верхний докембрий (Северная Евро-
па в границах бывшего СССР).** – М.: "Наука – Геология". 1994. –
39,3 л. (п)

Описано около 1700 терминов, отвечающих опубликованным на-
званиям стратиграфических подразделений.

*По всем вопросам приобретения книг просим обращаться
в Торговую фирму "Академкнига" РАН по адресу:*

*103624, ГСП, Москва, Б. Черкасский пер., 2/10
Тел. торгового отдела: 923-72-84*

3200 р.

кatalogная цена

1500 р.
Индекс 70393

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**Московского государственного университета
готовит специалистов по шести специальностям
направления «геология»**

**ГЕОЛОГИЯ ГЕОФИЗИКА ГЕОХИМИЯ
ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ И ГИДРОГЕОЛОГИЯ
ГЕОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ**

БАКАЛАВР — С П Е Ц И А Л И С Т — М А Г И С Т Р

При успешном выполнении учебного плана 1—4 курсов студенту присваивается квалификация бакалавра и выдается соответствующий диплом. Для желающих продолжить свое образование существуют два пути — продолжение обучения по выбранной специальности в течение 1 года и получение диплома специалиста геолога, геолога-геофизика, -геохимика, -гидрогеолога, -нефтяника, эколога-геолога; либо поступление на конкурсной основе в магистратуру со сроком обучения 2 года по одной из 50 программ (геология дна морей и океанов, палеонтология, сейсмометрия и сейсмология, ядерная геофизика, экологическая геология, гидрогеология глубоких горизонтов, искусственный литогенез, геотехнические системы в криолитозоне, морская нефтегазовая геология и др.). Закончившие магистратуру получают квалификацию магистра геологии.

У С Л О В И Я П Р И Е М А

На 1 курс принимаются абитуриенты России и СНГ, имеющие документ об окончании среднего учебного заведения, медсправку 086-у без серьезных замечаний по здоровью, успешно сдавшие вступительные экзамены, к которым относятся математика (письменно и устно) и сочинение, прошедшие по конкурсу.

**Набравшие по результатам двух экзаменов по математике
9—10 баллов — зачисляются на 1 курс**

Все студенты обеспечиваются государственной стипендиею, иногородним предствляется общежитие, имеется военная кафедра.

**Для непрошедших по конкурсу возможно зачисление сверх
плана приема при условии оплаты за обучения**

Сроки подачи документов для поступления на 1 курс с 20 июня по 1 июля. Вступительные экзамены с 3 по 20 июля. Телефон приемной комиссии 939-29-51.



«Н А У К А»