

На правах рукописи

УДК 624.131+550.4

Галкин Александр Николаевич

ДИФфуЗИОННО-ОСМОТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЛИНИСТЫХ  
ГРУНТОВ ГОМЕЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

Специальность 04.00.07 - инженерная геология,  
мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва - 1999

Работа выполнена на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова и кафедре геоэкологии Гомельского государственного университета им.Ф.Скорины

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук, чл.-корр.РАЕН, профессор В.А.Королев

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук, В.И.Сергеев

кандидат геолого-минералогических наук, С.Н.Емельянов

Ведущая организация:

институт геоэкологии РАН

Защита диссертации состоится **19** ноября 1999 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета К 053.05.06 в Московском государственном университете им.М.В.Ломоносова по адресу: 119899, ГСП, г.Москва, Воробьевы горы, МГУ, геологический факультет, ауд. **829**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке геологического факультета МГУ, сектор "А", 6 этаж.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим присылать по адресу: 119899, г.Москва, Воробьевы горы, МГУ, геологический факультет, ученому секретарю совета.

Автореферат разослан **19** октября 1999 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
по защите кандидатских диссертаций К 053.05.06,  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор

В.Н.Соколов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Современное состояние геологической среды Гомельского региона в значительной мере определяется распространением выдержанного по площади покрова слабопроницаемых моренных отложений днепровского возраста. Эти глинистые породы, а также глинистые отложения олигоцена-миоцена, претерпели в эпоху техногенеза существенное изменение, которое в основном обусловлено их химическим загрязнением.

Общие тенденции изменения глинистых грунтов региона сводятся к следующему: усиливается интенсивность их техногенного химического загрязнения различными компонентами в результате диффузии, в ряде мест отмечается искусственное нарушение (разрушение) природных глинистых экранов и потеря ими защитных свойств; на отдельных территориях интенсифицируются инженерно-геологические процессы, так или иначе связанные с глинистыми грунтами и осмотическими явлениями в них. Все эти процессы свидетельствуют об огромной экологической роли глинистых грунтов и их диффузионно-осмотических свойств в Гомельском регионе, значение которых особенно усиливается в эпоху техногенеза.

В связи с этим исследования диффузионно-осмотических свойств глинистых грунтов Гомельского региона с целью установления региональных закономерностей миграции некоторых основных химических компонентов-загрязнителей и роли в этом процессе глинистых грунтов носят актуальный характер. Кроме того, несмотря на имеющиеся данные по диффузионно-осмотическим процессам в глинах, многие вопросы остаются до конца не выясненными.

**Цель работы** заключалась в исследовании диффузионно-осмотических свойств глинистых отложений Гомельского промышленного района.

Достижение указанной цели потребовало решения ряда **задач**. Необходимо было:

- изучить инженерно-геологические (в том числе диффузионно-осмотические) особенности глинистых пород Гомельского района как элемента, определяющего в известной степени защищенность геологической среды от техногенного химического воздействия;

- разработать методику изучения и оценки диффузионных и осмотических процессов в глинистых грунтах с учетом их совместного протекания;

- выявить факторы и основные закономерности диффузионно-осмотических процессов в глинистых грунтах с учетом микроструктур-



ных особенностей глинистых пород, а также при миграции многокомпонентных растворов электролитов;

-установить закономерности миграционных (диффузионно-осмотических) характеристик глинистых грунтов Гомельского промрайона, позволяющие использовать их для эколого-геологической оценки территории.

**Научная новизна** работы заключается в следующем.

1. Разработана и усовершенствована экспериментально-методическая база для исследования диффузионно-осмотических процессов в глинистых грунтах, которая заключается в том, что:

-предложена новая лабораторная методика одновременного определения диффузионно-осмотических параметров в глинистых грунтах с возможностью постоянного (непрерывного) контроля изменения концентрации электролита порового раствора; разработан лабораторный прибор для этих определений;

-усовершенствована лабораторная методика определения диффузионно-осмотических параметров в полуограниченной трубке (метод Чернова);

-разработан метод прогнозных расчетов диффузии солей с учетом осмотического передвижения воды.

2. Составлены карты инженерно-геологического районирования и загрязненности подземных вод Гомельского промышленного района.

3. Впервые для глинистых грунтов Гомельского промышленного района различного генезиса и возраста одновременно изучены коэффициенты диффузии и осмоса для широкого спектра катионов и анионов, вовлеченных в техногенное химическое загрязнение геологической среды данного региона.

4. Изучены и выявлены новые закономерности диффузионно-осмотических процессов в глинистых грунтах с учетом миграции многокомпонентных растворов электролита и микроструктурных особенностей глинистых пород, заключающиеся в следующем:

-в случае нахождения в растворе электролита нескольких катионов и анионов диффузионно-осмотические параметры определяются способностью ионов оказывать упорядочивающее или разупорядочивающее действие на структуру связанной воды в порах глин;

-выявлена зависимость между диффузионно-осмотическими параметрами и количественными характеристиками строения порового пространства исследуемых грунтов (средний диаметр ( $d$ ), площадь ( $S$ ) и периметр ( $P$ ) пор): с увеличением средних значений  $d$ ,  $S$  и  $P$  пор коэффициенты диффузии  $D_{\text{ф}}$  возрастают, а осмоса  $K_{\text{ос}}$  снижаются.

5. Разработана типизация глинистых грунтов Гомельского промышленного района по диффузионно-осмотической проницаемости, позволяющая использовать ее для эколого-геологической оценки территорий.

**Практическая значимость полученных результатов** заключается в следующем:

-полученные диффузионно-осмотические параметры могут применяться для разработки миграционных моделей, так как диффузионно-осмотические свойства являются важным компонентом математических моделей массопереноса;

-полученные результаты по диффузионно-осмотическим свойствам глинистых грунтов являются важными показателями защищенности геологической среды, в связи с чем они могут использоваться для решения различных эколого-геологических задач;

-на основе результатов проведенных исследований могут осуществляться прогнозные оценки процесса массопереноса различных загрязняющих компонентов с использованием разработанной программы "DIFOSM";

-результаты исследований использованы кафедрой геоэкологии Гомельского госуниверситета при выполнении прогнозной оценки влияния Гомельского химзавода на качественный состав подземных вод.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Разработана и усовершенствована методика определения диффузионно-осмотических параметров в глинистых грунтах с возможностью постоянного (непрерывного) контроля изменения концентрации электролита порового раствора.

2. Выявлены новые закономерности диффузионно-осмотических свойств глинистых пород с учетом миграции в них многокомпонентных растворов электролита и их микроструктурных особенностей, заключающиеся в следующем:

-в случае нахождения в растворе электролита нескольких катионов и анионов диффузионно-осмотические параметры определяются способностью ионов и ионных комплексов оказывать упорядочивающее или разупорядочивающее действие на структуру связанной воды в порах грунта;

-выявлена зависимость между диффузионно-осмотическими параметрами глин и количественными характеристиками строения порового пространства (средние диаметр ( $d$ ), площадь ( $S$ ) и периметр ( $P$ ) пор): с увеличением средних значений  $d$ ,  $S$  и  $P$  пор коэффициенты диффузии  $D_{эф}$  возрастают, а осмоса  $K_{осм}$  снижаются.

3. На основе исследований диффузионно-осмотических свойств глинистых грунтов различного состава, возраста и генезиса проведена типизация глинистых грунтов Гомельского промышленного района по

диффузионно-осмотической проницаемости, позволяющая использовать ее для эколого-геологической оценки территорий.

**Исходные материалы.** В основу диссертации положены материалы, полученные лично автором во время работы в Гомельском государственном университете и учебе в заочной аспирантуре МГУ в период с 1992 по 1999 г.г. Оценка диффузионно-осмотических параметров проводилась на лабораторных установках, спроектированных и сконструированных лично автором. Автором проведено около 200 экспериментов (с 2-3-х кратной повторяемостью) в диффузионно-осмотической ячейке и около 30 опытов в полуограниченной трубке; длительность опытов составляла от 1 недели до 6 месяцев. Все полевые и лабораторные исследования по определению состава, физико-химических свойств грунтов выполнены лично автором или при его непосредственном участии. Исследования дополнены анализом фондовых материалов Гомельского государственного университета (1990-1998 г.г.), в которых автор также принимал непосредственное участие, Белорусской гидрогеологической экспедиции (1982-1983 г.г.) и Белорусского научно-исследовательского центра "Экология" (1993г.).

**Публикации и апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы докладывались на Первых научных чтениях (конференции) "Проблемы охраны геологической среды", (Минск, 1995); международной научной конференции "Эволюция инженерно-геологических условий Земли в эпоху техногенеза", (Москва, МГУ, 1997); конференции аспирантов и молодых ученых "Проблемы инженерной и экологической геологии", (Москва, МГУ, 1998). Результаты работы неоднократно обсуждались на научных семинарах кафедры геоэкологии Гомельского государственного университета (1994-1998) и аспирантском семинаре кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ (1998).

Основные результаты исследований отражены в 8 опубликованных научных работах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав и основных выводов общим объемом 169 страниц машинописного текста. Содержит 60 рисунков, 22 таблиц, 1 приложение. Список использованной литературы включает 168 наименований.

Работа выполнена под руководством доктора геолого-минералогических наук, чл.-корр.РАЕН, профессора В.А.Королева, которому автор глубоко признателен. Автор приносит глубокую благодарность кандидату геолого-минералогических наук, ст.н.с. В.Г.Шлыкову и доктору геолого-минералогических наук, профессору В.Н.Соколову за оказанную помощь при выполнении работы.

Автор также выражает искреннюю благодарность сотрудникам Гомельского госуниверситета к.г.-м.н. В.Г.Жогло, инженеру-химику В.В.Коцур, Л.Л.Федосенко, И.А.Красовской за всестороннюю помощь, оказанную в период выполнения работы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### ГЛАВА I. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ДИФфуЗИОННО - ОСМОТИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ

В литературном обзоре приводится материал по теории диффузии и осмоса в глинистых грунтах и о влиянии различных факторов на эти процессы.

Начало теоретическому изучению процессов движения солей под действием молекулярной диффузии в неподвижном поровом пространстве было положено работами А.Н.Щукарева, А.Эйнштейна, А.Нернста, И.Г.Богусского, Н.О.Каяндера, Дж.Кранка и др.

Первые экспериментальные данные по диффузии солей в природных дисперсных системах были получены М.Больши (1898), А.Мюнцем и Г.Годшоном (1909), Л.Мальво и Ж.Лефортом (1912), М.Мак-Кулом и Л.Витингом (1925). Среди первых отечественных исследований следует отметить работы А.Шошина (1929), М.Б.Гилиса (1935), Н.А.Комаровой, С.А.Долгова (1936,1937).

При аналитическом изучении процессов диффузии солей в дисперсных грунтах А.В.Лебедевым, В.А.Черновым, В.А.Приклонским, Н.П.Затенацкой, И.А.Сафохиной и др. проводится исследовательская работа по выявлению их эмпирических зависимостей и совершенствованию методов экспериментального анализа.

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал по исследованию диффузионных процессов. Значительный вклад в изучение диффузии вещества в водонасыщенных пористых средах внесли И.А.Брилинг, З.И.Товбина, Г.А.Аксельруд, М.А.Альтшулер, Н.А.Окнина, Л.И.Кульчицкий, В.М.Шестаков, С.Н.Емельянов и др. Среди зарубежных авторов следует отметить исследования Дж.Клинкенберга, Ф.С.Бэрона, В.Е.Бригама, Д.К.Кремера и др.

Несмотря на высокий уровень изученности диффузионной проницаемости пород за последнее десятилетие возрос интерес к данному вопросу в связи с увеличением значимости эколого-геологических проблем. В этом направлении следует отметить работы Т.Г.Макевской, Ю.А.Цапенко, В.Р.Шелла, К.Д.Мэйси. Использование новых методик

исследований в этой области позволяет делать более точные выводы о роли процессов диффузии в геологической среде.

Изучению осмотических явлений в глинистых породах посвящены немногочисленные экспериментальные работы. Наиболее обстоятельные исследования осмоса в глинах были выполнены Б.Ф.Рельтовым и др. (1954, 1955).

Наличие в дисперсных грунтах различных категорий связанной воды, деформирование скелета грунта при изменении влагосодержания, влияние на процессы переноса влаги электролитов потребовали детального исследования различных физико-химических и водно-физических свойств глинистых грунтов. В этом плане большой вклад в развитие теории осмоса в глинистых грунтах внесли такие ученые, как Р.И.Злочевская, И.А.Брилинг, В.А.Королев и др. Заслуживают внимание исследования по теории осмоса ученых и других научных направлений. В области исследования осмотического передвижения влаги в мерзлых грунтах большую известность получили работы А.П.Боженовой, З.А.Нерсесовой, Э.Д.Ершова, Е.М.Чувиллина, Ю.П.Лебедеко, А.М.Якиревича, в которых показана роль осмоса в процессах структурообразования и физико-химического деформирования мерзлых пород.

В работах ученых агрофизического направления - С.В.Нерпина, А.Ф.Чудновского, А.М.Глобуса - с использованием физико-математического подхода развивается теория влагопереноса в почвах. Большого внимания заслуживают работы Б.В.Дерягина, Н.В.Чураева, В.М.Мулера, Ю.И.Дытнерского. Путем сочетания методов физической химии поверхностных явлений и неравновесной термодинамики в этих работах получены кинетические уравнения, описывающие процессы капиллярного осмоса, обратного осмоса и термоосмоса.

Интенсивность диффузионно-осмотических процессов в дисперсных грунтах зависит от целого ряда внутренних и внешних (физических) факторов. Влияние многих из этих факторов, таких как химико-минеральный состав, дисперсность, влажность (плотность), характер структурных связей, структура порового пространства, состав и концентрация электролита, температура, давление, достаточно хорошо изучено.

Однако, несмотря на многочисленные работы, посвященные исследованию диффузионно-осмотических процессов в глинистых грунтах, некоторые вопросы остаются недостаточно изученными. В частности, недостаточно изучены вопросы диффузии и осмоса в глинистых породах при миграции веществ многокомпонентных растворов, влиянии микроструктурных особенностей грунтов на диффузионно-осмотические параметры и др. Почти отсутствуют результаты исследований диффузионно-осмотических свойств грунтов в региональном плане, в условиях Белоруссии подобных исследований практически не проводилось. Слабо



изучена прогнозная оценка свойств глинистых грунтов при совместном протекании диффузионно-осмотических процессов. Для практических целей эти данные представляют значительный интерес, так как они являются важными показателями защищенности геологической среды и могут использоваться для решения различных эколого-геологических задач.

В итоге анализа литературного материала автором в конце первой главы сформулированы задачи исследований, указанные выше во введении автореферата.

## **ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ГОМЕЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА**

Для выбора объектов исследований и установления закономерностей диффузионно-осмотических процессов в глинистых грунтах региона в данной главе рассматривается современное состояние геологической среды исследуемой территории. На основе анализа опубликованной и фондовой литературы (Богомолов Г.В., Бондаренко С.В., Бусел И.А., Васильев В.П., Герасимова Ж.А., Гурский Б.Н., Жогло В.Г., Журавель И.А., Козлов М.Ф., Колпашников Г.А., Кудельский А.В., Матвеев А.В. и др.) с использованием картографического материала Гомельского госуниверситета (1990-1998 г.г.) и Белорусской гидрогеологической экспедиции (1982-1983 г.г.) по геологическому строению, гидрогеологическим и геоморфологическим условиям проведена оценка состояния геологической среды района и построена карта инженерно-геологического районирования с выделением типов геологической среды на глубину техногенного химического воздействия.

Проведение качественного анализа изменений, происходящих в геологической среде, показало, что химическое загрязнение геологической среды Гомельского промышленного района в настоящее время носит региональный характер. Установлено, что в качестве основных элементов-загрязнителей в районе выступают сульфаты, хлориды, нитраты, нитриты, ионы фтора, аммония, натрия, кальция и тяжелые металлы. Это обусловлено спецификой промышленного и сельскохозяйственного производства, а также наиболее высоким содержанием этих элементов в компонентах геологической среды, всесторонним их воздействием на почвы, грунты, подземные воды и особенностями геохимического поведения в конкретной инженерно-геологической обстановке.

Анализ главных химических элементов-загрязнителей геологической среды Гомельского промрайона позволил определить их как высоко-

миграционные элементы в условиях химического загрязнения компонентов геологической среды исследуемой территории.

Проведена оценка поверхностного загрязнения подземной гидросферы Гомельского района и на основе этого составлена схематическая карта загрязнения подземных вод. Наиболее загрязненными в районе являются грунтовые воды, на отдельных участках наблюдается загрязнение и более глубоких водоносных горизонтов. Эти участки расположены, как правило, вблизи источников загрязнения или непосредственно в зоне их влияния.

Разработана классификация химического воздействия на геологическую среду Гомельского промышленного района с выделением видов и разновидностей воздействия, которая позволяет учесть различные источники химического воздействия и виды хозяйственной деятельности в районе и комплексно оценить состояние геологической среды.

### ГЛАВА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования диффузионно-осмотических свойств водонасыщенных дисперсных грунтов, установления региональных закономерностей миграции некоторых химических компонентов-загрязнителей и роли в этом процессе глинистых отложений были отобраны широко распространенные и наиболее типичные для Гомельского региона образцы глинистых пород - лагунно-морской ( $P_3^2$ ) и континентальный ( $P_3^1$ ) тяжелые суглинки олигоцена, озерно-аллювиальный тяжелый суглинок олигоцена-миоцена ( $P_3-N_1$ ) и ледниковые глинистые грунты нижнего и среднего плейстоцена: суглинок легкий (gl), суглинок средний и супесь тяжелая (gild). Отбор образцов и монолитов производился из естественных обнажений и горных выработок.

Для исследуемых грунтов выполнен комплекс лабораторных экспериментов, которые включали в себя традиционные определения состава и водно-физических свойств по стандартным методикам. Минеральный состав грунтов исследовался на дифрактометре "ДРОН-3" с количественным определением относительного содержания минералов, микростроение образцов изучалось на высокоразрешающем растровом электронном микроскопе типа "Hitachi S-800" с последующим количественным анализом растровых микроснимков на анализаторе структур.

В главе подробно рассматриваются химико-минеральный состав, структурно-текстурные особенности, физические и физико-химические свойства исследуемых грунтов.

## ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ДИФфуЗИОННО-ОСМОТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

В целях выяснения закономерностей диффузионно-осмотических процессов в глинистых грунтах был выполнен комплекс экспериментальных работ. Эксперименты проводились на образцах глинистых пород с ненарушенной (монолиты) и нарушенной структурой (глинистые пасты). Для получения более строгих закономерностей в некоторых опытах использовались моноионные Na-формы образцы.

В соответствии с поставленными задачами исследования диффузии и осмоса в глинистых грунтах было проведено несколько серий экспериментов по трем методикам.

Первая серия экспериментов включала в себя постановку опытов, направленных на изучение закономерностей диффузионно-осмотических процессов под влиянием различных факторов. Опыты проводились в диффузионно-осмотической ячейке двухкамерного типа оригинальной конструкции автора, позволяющей кондуктометрическим способом оперативно замерять концентрацию раствора в различные интервалы времени. В качестве электролитов использовались растворы солей  $KCl$ ,  $KNO_3$ ,  $K_2SO_4$ ,  $NaF$ ,  $NaCl$ ,  $NaNO_3$ ,  $NH_4Cl$  1н концентрации. Длительность каждого опыта составляла 8-10 суток и более. В ходе проведения эксперимента снимались показания отчетных капилляров и значения электрических сопротивлений растворов в боковых камерах прибора с последующим вычислением концентрации электролита через удельную электропроводность. По полученным данным рассчитывались объемная скорость осмотической фильтрации и эффективный коэффициент диффузии. До и после опыта проводилось комплексное опробование образцов грунта на влажность, плотность, минеральный состав, изучение структуры порового пространства. По завершении эксперимента отбирались боковые растворы для анализа химическими методами на содержание отдельных ионов исследуемых солей. Концентрацию ионов  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $F^-$ ,  $NO_3^-$  определяли потенциометрически по  $pCl$ ,  $pNa$ ,  $pF$ ,  $pNO_3^-$ ;  $NH_4^+$  - фотоколориметрическим методом.

Вторая серия экспериментов выполнялась в полуограниченной трубке (метод Чернова). Применение данной методики в исследованиях было обусловлено необходимостью проследить изменение влажности грунта по профилю в процессе диффузионного засоления с последующим построением модели диффузии солей с учетом осмотического передвижения воды, и сопоставлением полученных результатов с опытными данными в диффузионно-осмотической ячейке. Опыты проводились на образцах нарушенной и ненарушенной структуры, в качестве контактной среды использовались соли  $NaCl$ ,  $NaF$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $Na_2NO_3$ . Продолжи-

тельность одного эксперимента составляла 30 и более суток. По окончании опыта последовательно проводился расчет значений концентрации порового раствора и влажности. По результатам проведенных экспериментов для каждого образца и диффундирующего элемента рассчитывали коэффициент диффузии по приближенному решению (уравнение Чернова) и точному решению уравнения диффузии при граничном условии I-го рода. Скорость осмотического потока рассчитывали по графикам распределения конечных влажностей по длине образца.

На основании решения системы дифференциальных уравнений, описывающих диффузионно-осмотические процессы, была разработана программа "DIFOSM" на ПЭВМ для прогнозной оценки движения фронта загрязнения в глинистых грунтах с учетом осмотического передвижения воды применительно к условиям проведенных экспериментов в полуограниченной трубке.

Третья серия экспериментов была проведена на установке по изучению конвективно-дисперсионного переноса с целью оценки роли диффузионно-осмотических процессов в общем массопереносе загрязняющих веществ в слабопроницаемых грунтах. Опыты проводились на образцах ненарушенного (монолиты) сложения. Продолжительность каждого опыта составляла от 15 до 30 суток в зависимости от гранулометрического состава исследуемых грунтов. В качестве электролита использовалась смесь солей хлоридов, сульфатов, фосфатов Na, Ca общей минерализацией 12 г/л. Анализ проб электролита на химические элементы проводился по стандартным методикам. Результаты экспериментов обрабатывались по программе "MASSTRAN" (авторы А.В.Лехов, А.Л.Петров).

В главе приведено сопоставление различных методов расчета коэффициента диффузии в полуограниченной трубке. Установлено, что определение  $D_{\text{ф}}$  по уравнению Чернова и точному решению уравнения диффузии будет зависеть от продолжительности опыта. При длительности эксперимента около 30 суток следует применять уравнение Чернова, свыше 30 суток - наиболее приемлемо точное решение уравнения диффузии.

## **ГЛАВА 5. ОСОБЕННОСТИ ДИФФУЗИОННО-ОСМОТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ ПРИ МИГРАЦИИ ИОНОВ РАЗЛИЧНЫХ СОЛЕЙ**

Особенности диффузионно-осмотических процессов в глинистых грунтах при миграции ионов различных солей определяются комплексом факторов и, в первую очередь, химико-минеральным составом, который

проявляется через дисперсность и гидрофильность составляющих грунт минералов.

Достаточно большое генетическое и возрастное различие исследуемых грунтов проявилось в значительном отличии их минерального состава. Изучение влияния минерального состава на диффузионно-осмотические параметры проводилось на исследуемых грунтах при взаимодействии их с растворами солей NaF,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ .

Для оценки влияния минерального состава грунтов на диффузионно-осмотические параметры проведен корреляционный анализ взаимосвязи каждого минерального компонента грунта с параметрами диффузии и осмоса. Исследовались парные связи между коррелируемыми величинами для глинистых пород палеогенового комплекса и моренных супесей в отдельности.

При сравнении корреляционных связей  $D_{эф}$  ионов электролитов с кластогенными минералами (кварц, альбит, микроклин) в моренных супесях наблюдается тесная прямая связь только с микроклином; с кварцем и альбитом связь слабая или вообще отсутствует. Тогда как в глинистых породах палеогенового комплекса зависимость  $D_{эф}$  по ионам  $\text{NH}_4^+$ , F и  $\text{NO}_3^-$  от кластогенных минералов характеризуется обратной связью (табл.1). Такое различие в парных коэффициентах корреляции связано с фактором дисперсности, обуславливающим ту или иную гидрофильность и емкость обмена: чем выше дисперсность грунта, а следовательно, выше гидрофильность и емкость обмена, при наличии высокого содержания кластогенных минералов, тем ниже значение  $D_{эф}$ .

Влияние глинистых минералов (гидрослюда, каолинит, смешанослойные минералы) на  $D_{эф}$  в наибольшей степени проявляется в супесчаных грунтах моренного комплекса. С увеличением содержания гидрослюда и каолинита значения  $D_{эф}$  возрастают, в то время, как высокое содержание смешанослойных минералов (гидрослюда - монтмориллонит) приводит к снижению значений  $D_{эф}$ .

Исследование связи осмотических параметров и минерального состава на образцах моренных супесей показало значительное влияние глинистых минералов на осмос (рис.1а). Установлена тесная прямая связь  $K_{осм}$  с содержанием гидрослюда и смешанослойных минералов. Для глинистых пород палеогенового комплекса характер связи  $K_{осм}$  с минеральным составом несколько иной (рис.1б). В этом случае для  $K_{осм}$  наиболее тесная прямая связь наблюдается с альбитом, микроклином и смешанослойными минералами; с каолинитом - обратная связь. Влияние кластогенных минералов (альбит, микроклин) на  $K_{осм}$  в палеогеновых суглинках следует, вероятно, связывать, как и для  $D_{эф}$ , со степенью дисперсности грунтов.

Таблица 1

Коэффициенты парной корреляции эффективного коэффициента диффузии (D эф) ионов электролитов и содержания различных минералов в глинистых грунтах

Эффективный коэффициент диффузии ионов электролитов	Минеральный состав							смешанослойные минералы
	кварц	альбит	микроклин	кальцит + доломит	каолинит	гидро- слюда		
	супесь моренная							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	(0,267)*	(-0,387)	0,692	(-0,274)	0,893	(0,624)	(-0,670)	
F <sup>-</sup>	(0,449)	(0,063)	0,999	-0,991	0,927	0,795	-0,782	
Na <sup>+</sup>	(0,089)	(0,110)	0,914	(-0,624)	0,905	0,923	-0,931	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	(0,113)	(-0,005)	0,932	(-0,644)	0,952	0,868	-0,878	
	суглинки палеогенового комплекса							
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,686	(-0,592)	-0,925	-	0,996	(-0,363)	(-0,668)	
F <sup>-</sup>	(-0,273)	-0,896	-0,996	-	0,926	(0,110)	-0,935	
Na <sup>+</sup>	0,938	(0,170)	(0,660)	-	-0,851	0,739	(0,266)	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	(-0,224)	-0,917	-0,990	-	0,906	(0,157)	-0,952	

(\*) - в скобках указаны коэффициенты корреляции незначимо отличные от нуля

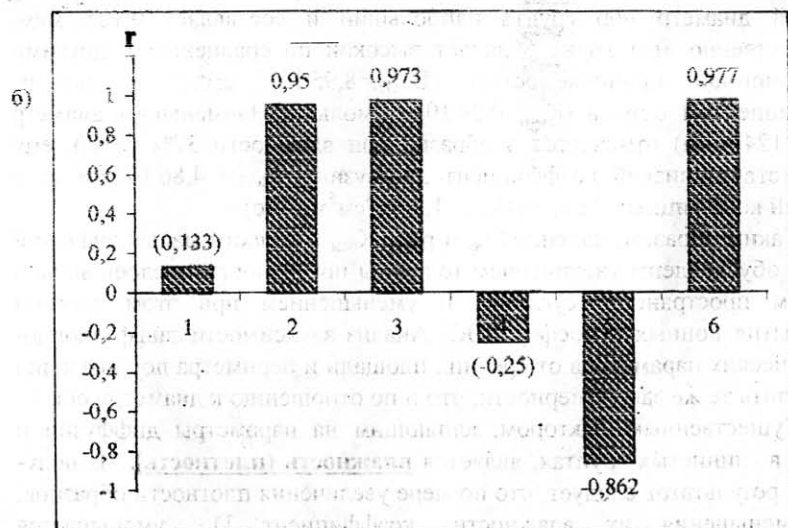
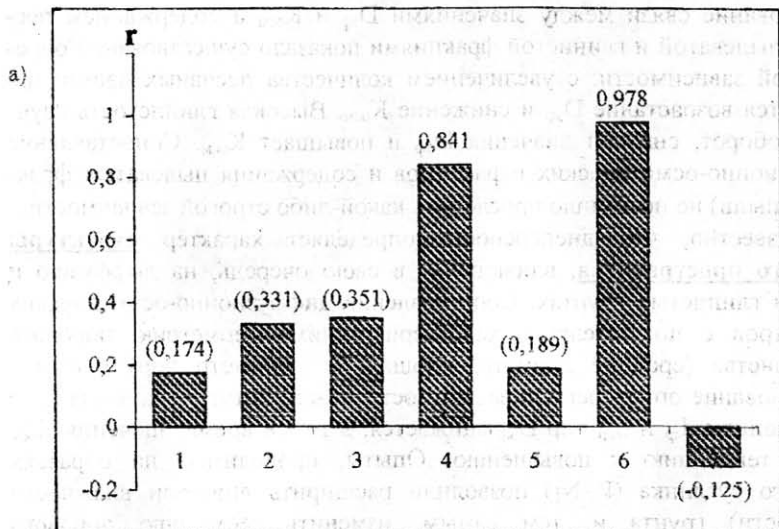


Рис. 1. Значения коэффициентов парной корреляции коэффициента осмоса ( $K_{осм}$ ) и содержания различных минералов в: а) моренных грунтах; б) грунтах палеогенового комплекса при  $\nabla C_{NaNO_3} 1,0$  моль/см<sup>4</sup>.  
1 - кварц; 2 - альбит; 3 - микроклин; 4 - гидрослюда; 5 - каолинит; 6 - смешанослойные минералы; 7 - карбонатные минералы (кальцит, доломит)

Влияние **дисперсного состава** исследуемых грунтов на диффузию и осмос рассмотрено на примере глинистых пород моренного комплекса. Исследование связи между значениями  $D_{\text{эф}}$  и  $K_{\text{осм}}$  и содержанием песчаной, пылевой и глинистой фракциями показало существование определенной зависимости: с увеличением количества песчаных частиц наблюдается возрастание  $D_{\text{эф}}$  и снижение  $K_{\text{осм}}$ . Высокая глинистость грунтов, наоборот, **снижает** значения  $D_{\text{эф}}$  и **повышает**  $K_{\text{осм}}$ . Сопоставление диффузионно-осмотических параметров и содержания пылевых фракций ( $\Sigma$  пыли) не позволило проследить какой-либо строгой зависимости.

Известно, что дисперсность определяет характер **структуры порового пространства**, влияющего, в свою очередь, на диффузию и осмос в глинистых грунтах. Сопоставление диффузионно-осмотических параметров с показателями, характеризующими геометрию порового пространства (средние диаметр, площадь и периметр пор) показало существование определенной зависимости между этими показателями: с уменьшением  $d_{\text{ср}}$  и  $S_{\text{ср}}$  пор  $D_{\text{эф}}$  **снижается**, в то же время, значения  $K_{\text{осм}}$  имеют тенденцию к **повышению**. Опыты, проводимые на образцах тяжелого суглинка ( $P_3-N_1$ ) позволили расширить диапазон влажности (плотности) грунта и, тем самым, изменить геометрию порового пространства в более широких пределах. Так, при влажности 30% ( $\approx W_1$ ) средний диаметр пор грунта наибольший и составляет 0,185 мкм, соответственно этот грунт обладает высокой по сравнению с другими диффузионной проницаемостью ( $D_{\text{NO}_3} = 8,95 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с) и низким коэффициентом осмоса ( $K_{\text{осм}} = 0,24 \cdot 10^{-5}$  см<sup>3</sup>моль/с). Наименьший диаметр пор (0,124 мкм) отмечается в образце при влажности 37% ( $> W_1$ ), ему соответствует низкий коэффициент диффузии ( $D_{\text{NO}_3} = 4,86 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с) и высокий коэффициент осмоса ( $K_{\text{осм}} = 1,2 \cdot 10^{-4}$  см<sup>3</sup>моль/с).

Таким образом, падение  $D_{\text{эф}}$  и рост  $K_{\text{осм}}$  в области малых значений  $d_{\text{ср}}$  пор обусловлены увеличением толщины поверхностных слоев воды в поровом пространстве суглинка и уменьшением при этом степени перекрытия ионных атмосфер ДЭС. Анализ зависимости диффузионно-осмотических параметров от средних площади и периметра пор позволил проследить те же закономерности, что и по отношению к диаметру пор.

Существенным фактором, влияющим на параметры диффузии и осмоса в глинистых грунтах, является **влажность (плотность)**. Из полученных результатов следует, что по мере увеличения плотности образцов, т.е. уменьшения их влажности, коэффициент  $D_{\text{эф}}$  **уменьшается** (рис.2а,2б), что подтверждает ранее установленные И.А.Брилинг зависимости.

Анализ зависимости осмотических параметров ( $V_{\text{осм}}$  и  $K_{\text{осм}}$ ) от влажности-плотности исследуемых образцов (рис.3а,3б), подтвердил закономерности, ранее установленные для различных глинистых пород:



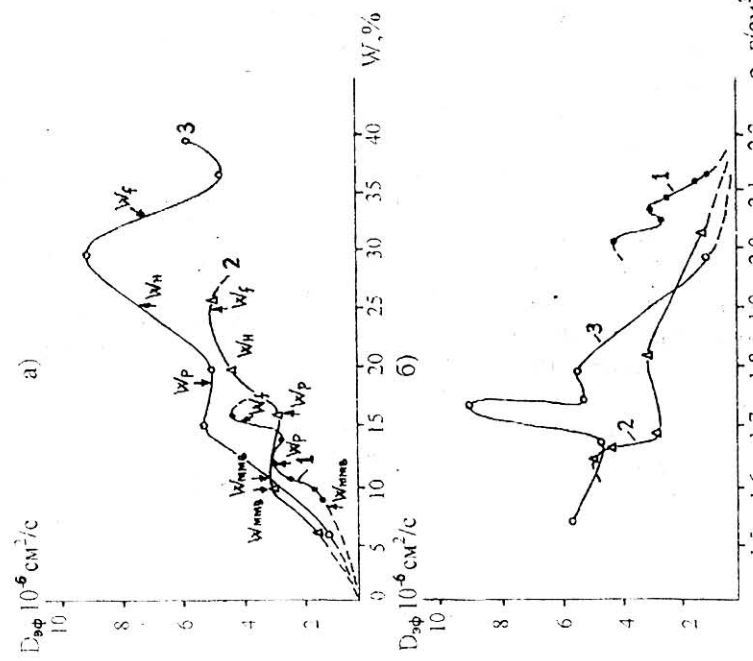


Рис.2. Зависимость эффективного коэффициента диффузии ( $D_{эф}$ )  $NO_3^-$  в глинистых грунтах от влажности  $W$  (а) и плотности  $\rho$  (б) при градиенте концентрации  $1,0 \text{ моль/см}^4$   $NaNO_3$   
 1 - сугесь тяжелая (gId); 2 - суглинок средний (gId);  
 3 - суглинок тяжелый (P3-N1)

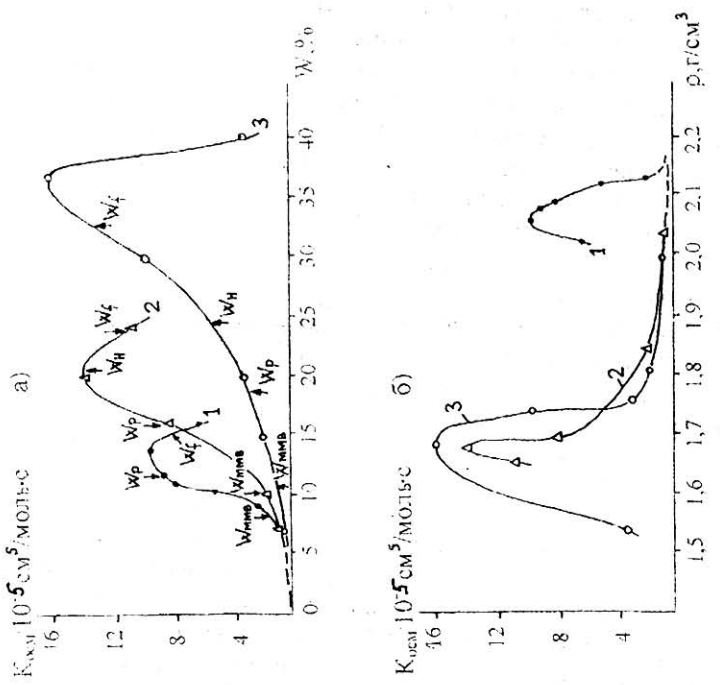


Рис.3. Зависимость коэффициента осмоса ( $K_{осм}$ ) в глинистых грунтах от влажности  $W$  (а) и плотности  $\rho$  (б) при градиенте концентрации  $NaNO_3$   $1,0 \text{ моль/см}^4$   
 1 - сугесь тяжелая (gId); 2 - суглинок средний (gId);  
 3 - суглинок тяжелый (P3-N1)

передвижение порового раствора в глинах при осмосе практически начинается при влажности, близкой к нижнему пределу пластичности ( $W_p$ ), т.е. в условиях существования сплошного слоя воды в порах породы, содержащей "осмотически поглощенную" влагу в пределах диффузной части ДЭС (Злочевская Р.И., Королев В.А.). Увеличение влажности сверх  $W_p$  приводит к росту  $V_{осм}$  и  $K_{осм}$  не только за счет более полного развития диффузного слоя ДЭС, но и за счет увеличения диаметра пор образца. Этот процесс имеет место вплоть до влажности, близкой к полному водопоглощению (набуханию) глин  $W_n$  (рис.3а).

Основываясь на результатах исследований влияния различных факторов на диффузионно-осмотические свойства глинистых грунтов, можно отметить, что фактор влажности-плотности - главный, т.к. в наибольшей степени влияет на  $D_{эф}$  и  $K_{осм}$  (почти на порядок).

Влияние вида электролита на диффузионно-осмотические процессы в глинистых грунтах изучено в исследуемых образцах при взаимодействии их с моноэлектролитами и полиэлектролитами. В качестве исследуемых электролитов выбраны растворы солей NaF,  $K_2SO_4$ , KCl и  $KNO_3$ , а также их бинарные смеси NaF+ $K_2SO_4$ ,  $KNO_3$ +KCl с 1n концентрацией. Проведенное сравнение полученных значений  $D_{эф}$  ионов различных солей в исследуемых грунтах показало, что из анионного комплекса в однокомпонентных растворах более высокие значения  $D_{эф}$  имеет ион  $Cl^-$ , низкие - ион  $F^-$ . При сравнении значений  $D_{эф}$  анионов в моноэлектролитах с растворами полиэлектролитов наблюдается некоторое снижение значений  $D_{эф}$  у  $SO_4^{2-}$  и  $F^-$ , и увеличение  $D_{эф}$   $Cl^-$  и  $NO_3^-$ . Следует заметить, что  $D_{эф}$   $Cl^-$  и  $NO_3^-$  в бинарной смеси имеют близкие значения, в то время как в однокомпонентных смесях  $D_{Cl^-}$  в 1,5 раза выше  $D_{NO_3^-}$ . Эти различия обусловлены структурными изменениями в связанной воде, происходящими при растворении каждого иона в отдельности. Наличие в воде положительно или отрицательно гидратированных ионов приводит, по данным О.Я.Самойлова и Г.А.Крестова, к двум взаимно противоположным процессам изменения структуры воды: нарушению упорядоченности структуры воды или более упорядоченному размещению молекул воды вокруг иона. Любое изменение подвижности молекул воды при гидратации ионов сказывается на энтропийной характеристике гидратации ( $\Delta S_{гид}$ ), которая (по Г.А.Крестову) служит количественной характеристикой при разделении ионов на две группы: ионы с положительной ( $-\Delta S_{гид} > 0$ ) и ионы с отрицательной ( $-\Delta S_{гид} < 0$ ) гидратацией. Ионы с отрицательной гидратацией ( $-\Delta S_{гид} < 0$ ) обуславливают наибольшие значения коэффициентов диффузии  $D$ . Так, суммарный эффект изменения энтропии в смеси растворов NaF и  $K_2SO_4$  по сравне-

нию с отдельно взятыми растворами минимален ( $-\Delta S_{\text{п}}=133,6$ , Дж/моль $^{-1}$  К $^{-1}$ ), в то же время коэффициенты диффузии  $F^-$  и  $SO_4^{2-}$  в смеси имеют низкие значения по отношению к  $D_{\text{эф}}$  отдельных электролитов (рис.4). Коэффициенты диффузии ионов  $NO_3^-$  и  $Cl^-$  в смеси с  $K^+$  дают одинаковые (близкие) значения, так как характеризуются сходными радиусом ионов и изменением энтропии  $\Delta S_{\text{п}}$ , тогда как в отдельно взятых растворах электролитов  $D_{Cl^-}$  выше, чем у иона  $NO_3^-$ .

Изменение структуры растворителя (воды) присутствующими в нем ионами предполагает и изменение осмотических процессов.

Таким образом, полученные данные по диффузии и осмосу смесей согласуются с энтропийными представлениями о гидратационной способности ионов.

На основании экспериментальных исследований для глинистых грунтов Гомельского промышленного района проведена их типизация по диффузионной и осмотической проницаемости в зависимости от консистенции (табл.2,3), позволяющая более полно учитывать особенности и закономерности миграции загрязняющих веществ через разделяющие слабопроницаемые грунты.

## ГЛАВА 6. МИГРАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

С целью получения прогнозных оценок миграции загрязняющих веществ с учетом осмотического передвижения влаги нами выполнены численные расчеты на ПЭВМ по программе "DIFOSM" для глинистых грунтов различной степени дисперсности. В ходе расчетов была получена удовлетворительная сходимость теоретических и экспериментальных результатов, подтверждающая правильность выбранного подхода к моделированию миграции ионов электролитов в глинистых грунтах при наличии встречного осмотического потока.

Для условий Гомельского региона (на примере Гомельского химзавода) проведена оценка диффузионного переноса ионов электролитов через глинистые породы в общем балансе миграции загрязняющих веществ. Установлена преобладающая роль конвективной диффузии. Однако, при определенных условиях (низкие фильтрационные свойства), роль молекулярной диффузии в процессах массопереноса вещества через глинистые породы может существенно возрасти и даже оказаться преобладающей.

С учетом конвективно-диффузионной составляющей на ПЭВМ по программе "MIG-2" (автор А.А.Кувасв) выполнено моделирование миграции загрязненных сульфатами вод в районе Гомельского химзавода на четырехслойной профильной математической модели. По результатам

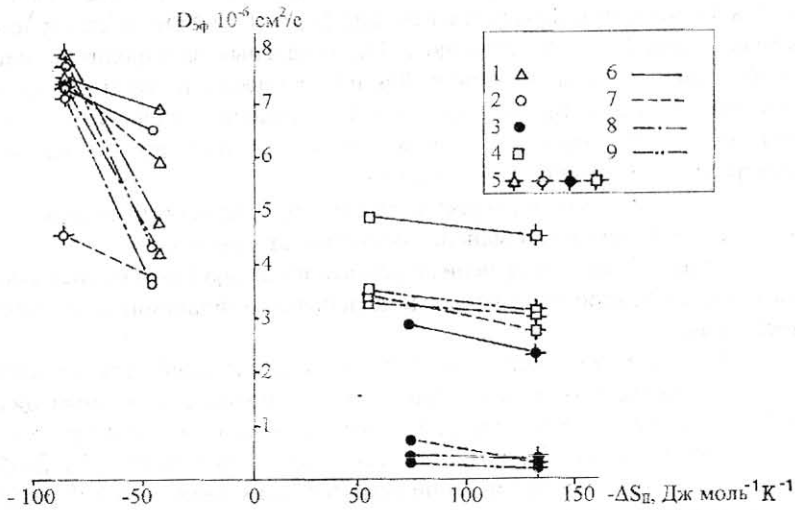


Рис. 4. Зависимость эффективного коэффициента диффузии ( $D_{эф}$ ) анионов различных солей моно- и полиэлектролитов от изменения энтропии гидратации ( $-\Delta S_H$ ) в глинистых грунтах различного состава

Анионы моноэлектролитов: 1 - Cl; 2 - NO<sub>3</sub>; 3 - F; 4 - SO<sub>4</sub>. 5 - анионы полиэлектролитов; 6 - суглинок тяжелый (P<sub>3</sub><sup>3</sup>); 7 - суглинок тяжелый (P<sub>3</sub>-N<sub>1</sub>); 8 - суглинок средний (gHd); 9 - супесь тяжелая (gHd).

расчетов установлено положение фронта загрязнения в подморенном нижне-среднеплейстоценовом, палеогеновом, верхнемеловом и альб-сеноманском (K<sub>1-2</sub>) водоносных горизонтах на различные моменты времени. К настоящему времени фронт загрязнения с концентрацией сульфатов до 140 мг/л достиг верхнемелового водоносного горизонта. В последующем ожидается постепенный рост содержания сульфатов до 730 мг/л (2020-2030 г.г.). В альб-сеноманском водоносном горизонте, эксплуатируемом водозаборами г.Гомеля, признаки загрязнения подземных вод могут появиться только в 2020-2030 г.г., причем под влиянием отвалов фосфогипса химзавода рост концентрации сульфатов не превысит 2-3 мг/л, что находится в пределах точности измерений. Следует также заметить, что на модели учтено только влияние отвалов фосфогипса, тогда как качественный состав подземных вод будет определяться всеми существующими источниками загрязнения (свалка бытовых и промышленных отходов, очистные сооружения, бытовое загрязнение в районах частной застройки и т.д.).

Таблица 2

Типизация глинистых грунтов Гомельского промышленного района по диффузионной проницаемости иона  $\text{NO}_3^-$  в зависимости от консистенции

Название грунта	Возраст	Относительная степень диффузионной проницаемости глинистых грунтов и соответствующий интервал изменения значений $D_{\text{дф}}$ ( $\times 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$ )		
		низкая $D_{\text{дф}} < 2,5$	средняя $2,5 \leq D_{\text{дф}} \leq 5,0$	высокая $D_{\text{дф}} > 5,0$
супесь тяжелая	gII	-	твердая	пластичная, текучая
суглинок легкий	gI	твердый, полутвердый	тугопластичный	мягко-текучепластичный, текучий
суглинок средний	gII	твердый	полутвердый, тугопластичный	мягко-текучепластичный, текучий
суглинок тяжелый	$P_3^2, P_3, P_3 - N_1$	твердый	полутвердый, тугопластичный	мягко-текучепластичный, текучий

Таблица 3

Типизация глинистых грунтов Гомельского промышленного района по осмотической проницаемости в зависимости от показателя консистенции

Название грунта	Возраст	Относительная степень осмотической проницаемости глинистых грунтов и соответствующий интервал изменения значений $K_{\text{осм}}$ ( $\times 10^5 \text{ см}^5/\text{моль с}$ )		
		низкая $K_{\text{осм}} < 2$	средняя $2 \leq K_{\text{осм}} \leq 8$	высокая $K_{\text{осм}} > 8$
супесь тяжелая	gII	твердая, текучая	-	пластичная
суглинок легкий	gI	твердый, текучий	полутвердый, тугопластичный	мягко-текучепластичный
суглинок средний	gII	твердый, текучий	полутвердый, тугопластичный	мягко-текучепластичный
суглинок тяжелый	$P_3 - N_1$	твердый, текучий	полутвердый, тугопластичный	мягко-текучепластичный
суглинок тяжелый	$P_3^3, P_3^2$	твердый, текучий	полутвердый, тугопластичный, мягкопластичный	текучепластичный

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты исследований по миграции ионов химических элементов в глинистых грунтах юго-востока Белоруссии, отражающие научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, сводятся к следующему.

1. Разработана и усовершенствована экспериментально-методическая база для исследования диффузионно-осмотических процессов в дисперсных грунтах:

-на базе традиционного двухкамерного прибора предложена новая методика одновременного определения диффузионно-осмотических параметров в глинистых грунтах с возможностью постоянного контроля изменения концентрации электролита порового раствора;

-усовершенствована методика определения параметров диффузии и осмоса в полуограниченной трубке. Уточнена возможность применения уравнения В.А.Чернова для определения коэффициента диффузии и точного решения уравнения диффузии в зависимости от длительности проведения эксперимента. Установлено, что при малой продолжительности опыта (около 30 сут) наиболее применимо уравнение Чернова, свыше 30 сут рекомендуется использовать точное решение уравнения диффузии;

-разработан метод прогнозных расчетов диффузии электролитов с учетом осмотического передвижения воды, позволяющий при заданных начальных и граничных условиях отслеживать распределение влаги и растворенных веществ по грунтовому профилю.

2. Выявлены новые закономерности диффузионно-осмотических процессов в глинистых породах с учетом миграции многокомпонентных растворов электролита и микроструктурных особенностей глинистых пород:

-в случае нахождения в растворе электролита нескольких катионов и анионов диффузионно-осмотические параметры определяются способностью ионов оказывать упорядочивающее или разупорядочивающее действие на структуру воды;

-выявлена зависимость между диффузионно-осмотическими параметрами и количественными характеристиками строения порового пространства глинистых грунтов (средние диаметр ( $d$ ), площадь ( $S$ ) и периметр ( $P$ ) пор): с увеличением средних значений  $d$ ,  $S$  и  $P$  пор коэффициенты  $D_{эф}$  возрастают, а  $K_{осм}$  снижаются.

3. Проведена оценка состояния геологической среды Гомельского промышленного района:

-разработана классификация химического воздействия на геологическую среду Гомельского промышленного района, позволяющая комплексно оценить состояние геологической среды;

-проведена типизация глинистых пород Гомельского промышленного района по диффузионно-осмотической проницаемости в зависимости от их состояния по показателю консистенции;

-на примере Гомельского химического завода проведена оценка диффузионного переноса через глинистые породы в общем балансе миграции загрязняющих веществ. Установлена преобладающая роль конвективной диффузии;

-с учетом конвективно-диффузионной составляющей выполнено моделирование миграции загрязненных вод в районе Гомельского химзавода на четырехслойной профильной математической модели. Установлено положение фронта загрязнения в подморенном нижне-среднеплейстоценовом, палеогеновом, верхнемеловом и альб-сеноманском ( $K_{1-2}$ ) водоносных горизонтах на различные моменты времени.

Полученные данные по диффузионно-осмотическим свойствам глинистых грунтов позволяют рассматривать их, как основу для разработки прогнозных оценок эколого-геологического состояния территорий в пределах юго-востока Белоруссии.

#### **Основные положения диссертации отражены в работах:**

1. О загрязнении подземных вод в районе Гомеля // Природные и социально-экономические комплексы Белорусского Полесья в экстремальных условиях: Тез.докл.конф. - Гомель, 1992. - С.40-42. (Соавторы: Жогло В.Г., Журавель Н.А.)

2. Хозяйственная деятельность и защита окружающей среды // Проблемы охраны геологической среды: Тез.докл.конф. - Минск, 1995. - С.72-73. (Соавтор: Иванов Ю.П.)

3. Влияние хозяйственной деятельности на состав подземных вод в районе Гомеля // Проблемы охраны геологической среды: Тез.докл.конф. - Минск, 1995. - С.87-88. (Соавторы: Жогло В.Г., Журавель Н.А.)

4. Исследование диффузионно-осмотических свойств глинистых грунтов в связи с геоэкологическими проблемами // Проблемы охраны геологической среды: Тез.докл.конф. - Минск, 1995. - С.130-131.

5. Проблемы эволюции глинистых грунтов Гомельской области в эпоху техногенеза // Эволюция инженерно-геологических условий земли в эпоху техногенеза: Труды Междунар.науч.конф. (Россия, Москва, 28-29 мая 1997 г.) - М.: Изд-во МГУ, 1997. - С.156. (Соавтор: Королев В.А.)

6. Современное эколого-геологическое состояние Гомельского промышленного района в связи с химическим загрязнением // Экологические проблемы измененных ландшафтов. - Гомель, 1998. - С.14-25

7. Диффузионно-осмотические свойства слабопроницаемых пород Гомельского региона // Экологические проблемы измененных ландшафтов. - Гомель, 1998. - С.25-28

8. Методика исследования диффузии солей в глинистых грунтах // Проблемы инженерной и экологической геологии: Тез. докл. конф. - М., МГУ, 1998. - С.13 (Соавтор: Королев В.А.)





Подписано в печать 14.09.1999 г. Бумага офсетная. Усл.п.л. 1,3.  
Тираж 100 экз. Заказ № 105 .

Отпечатано на ротапринтере ГГУ им. Ф.Скорины.  
246699, г.Гомель, ул.Советская,104

2993848



0000000 1744 188