Министерство образования Республики Беларусь
Белорусский государственный университет
Факультет географии и геоинформатики
Кафедра почвоведения и геоинформационных систем

СОГЛАСОВАНО
Заведующий кафедрой
_____Клебанович Н. В.
«10» мая 2019 г.

СОГЛАСОВАНО
Декан факультета
_____ Курлович Д. М.
«28» июня 2019 г.

СОГЛАСОВАНО
Председатель
учебно-методической комиссии факультета
_____ Брилевский М. Н.
«26» июня 2019 г.

Геохимия ландшафтов

Электронный учебно-методический комплекс
для специальностей:
1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)»
направления специальности:
1-56 02 02-01 «Геоинформационные системы (земельно-кадастровые)»,
1-56 02 02-02 Геоинформационные системы (специальные)»;
1-31 02 01 «География (по направлениям)»
направление специальности:
1-31 02 01-02 География (научно-педагогическая деятельность)

Регистрационный № 0308/04-93

Составители:
Н. В. Ковальчик, кандидат географических наук, доцент;
Н. К. Чертко, доктор географических наук, профессор;
А. А. Карпиченко, кандидат географических наук, доцент;
Н. В. Жуковская, кандидат географических наук, доцент.

Рассмотрено и утверждено на заседании Научно-методического совета БГУ 03.12.2019 г., протокол № 2.

Минск 2019

УДК 911.52:550.4(075.8)
Г 367

Утверждено на заседании Научно-методического совета БГУ
Протокол № 2 от 03.12.2019 г.

Решение о депонировании вынес:
Совет факультета географии и геоинформатики
Протокол № 10 от 28.06.2019 г.

С о с т а в и т е л и:

Ковальчик Надежда Владимировна, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры почвоведения и геоинформационных систем БГУ;

Чертко Николай Константинович, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры почвоведения и геоинформационных систем БГУ;

Карпиченко Александр Александрович, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры почвоведения и геоинформационных систем БГУ;

Жуковская Наталья Викторовна, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры почвоведения и геоинформационных систем БГУ.

Рецензенты:

кафедра физической географии УО «Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка» (зав. кафедрой Таранчук А. В., кандидат географических наук, доцент);

Санец Е. В., заведующий лабораторией ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси», кандидат географических наук, доцент.

Геохимия ландшафтов : электронный учебно-методический комплекс для специальностей: 1-56 02 02 «Геоинформационные системы», направления специальности: 1-56 02 02-01 «Геоинформационные системы (земельно-кадастровые)», 1-56 02 02-02 «Геоинформационные системы (специальные)»; 1-31 02 01 «География (по направлениям)», направление специальности: 1-31 02 01-02 «География (научно-педагогическая деятельность)» / БГУ, Фак. географии и геоинформатики, Каф. почвоведения и геоинформационных систем ; сост.: Н. В. Ковальчик [и др.]. – Минск : БГУ, 2019. – 68 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 68.

Электронный учебно-методический комплекс предназначен для студентов, обучающихся по специальностям 1-56 02 02 «Геоинформационные системы» и 1-31 02 01 «География». Содержание ЭУМК предполагает повышение эффективности управления образовательным процессом и самостоятельной работой студентов по освоению учебной дисциплины «Геохимия ландшафтов» с помощью внедрения в образовательный процесс инновационных образовательных технологий, обеспечение качественной подготовки высококвалифицированных специалистов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА 4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ 6
1.1. Предмет геохимии ландшафта. Ландшафтно-геохимические процессы 6
1.2. Миграция элементов в природных растворах. Геохимические барьеры 8
1.3. Геохимические классификации химических элементов 10
1.4. Геохимические классификации ландшафтов 12
1.5. Геохимическая структура ландшафтов. Геохимические барьеры 18
1.6. Геохимия лесных ландшафтов 24
1.7. Степные ландшафты 30
1.8. Геохимия ландшафтов пустынь, тундры, верховых болот 34
1.9. Геохимия Мирового океана 38
1.10. Геохимия городских ландшафтов. Геохимия агроландшафтов 41
1.11. Методика ландшафтно-геохимического анализа города 48
1.12. Растительный покров города. Эколого-геохимическая оценка влияния на пригородные ландшафты 52
1.13. Комплексная оценка состояния городской среды. Оценка экологического риска 53
2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ 56
Тема 1. Составление карты геохимических ландшафтов административного района Беларуси 56
Тема 2. Определение фоновых и аномальных содержаний химических элементов 56
Тема 3. Геохимическая структура ландшафтов 57
Тема 4. Построение моноэлементных карт содержания техногенных элементов в почвах города. Суммарный показатель загрязнения почв 57
Тема 5. Выделение и картографирование ассоциаций химических элементов 58
3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ 60
3.1. Перечень тестов и контрольных заданий 60
3.2. Вопросы к зачету по дисциплине 61
3.3. Организация самостоятельной работы 63
4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ 64
4.1. Учебно-методическая карта по учебной дисциплине 64
4.2. Рекомендуемая литература 68
4.3. Электронные ресурсы 68

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по учебной дисциплине «Геохимия ландшафтов» предназначен для реализации требований образовательных программ, образовательного стандарта и учебного плана по специальностям 1-56 02 02 «Геоинформационные системы» и 1-31 02 01 География. Его наличие обеспечивает стабильность качества образовательного процесса и является методической основой для обеспечения эффективной самостоятельной работы студентов.

ЭУМК по учебной дисциплине «Геохимия ландшафтов» создан на научно-методическом и программно-техническом уровнях, соответствующих современным информационно-коммуникационным технологиям и призван обеспечить реализацию учебных целей и задач на всех этапах образовательного процесса по данной дисциплине.

Назначение – реализация требований образовательного стандарта и учебной программы, обеспечение непрерывности и полноты процесса обучения, систематизации и контроля знаний по учебной дисциплине «Геохимия ландшафтов».

Цель ЭУМК – повышение эффективности управления образовательным процессом и самостоятельной работой студентов по освоению учебной дисциплины «Геохимия ландшафтов» с помощью внедрения в образовательный процесс инновационных образовательных технологий, обеспечение подготовки высококвалифицированных специалистов.

Область применения – на лабораторно-практических занятиях по курсу «Геохимия ландшафтов», в ходе самостоятельной подготовки к аудиторным занятиям, текущему и итоговому контролю знаний по разделам дисциплины, ориентация в выполнении управляемой самостоятельной работы.

Функциональные возможности ЭУМК – средство ориентации в содержании дисциплины «Геохимия ландшафтов» и порядке изучения учебного материала, освоение теоретического и практического материала, подготовка к контролю знаний. Весь материал ЭУМК структурирован *по* разделам таким образом, чтобы знаниями по учебной дисциплине «Геохимия ландшафтов» студент мог овладеть самостоятельно. ЭУМК по учебной дисциплине «Геохимия ландшафтов» включает 4 основных раздела: теоретический, практический, контроля знаний и вспомогательный.

Теоретический раздел ЭУМК содержит конспект лекций для теоретического изучения учебной дисциплины, на основе учебного пособия Геохимия ландшафта : учеб. пособие / Н. К. Чертко [и др.] [электронный ресурс] / Электронная библиотека БГУ. – Режим доступа: http://elib.bsu.by/handle/123456789/44211 – Дата доступа 25.11.2019.

Геохимия и экология химических элементов: Справочное пособие / Н.К. Чертко, Э.Н. Чертко [электронный ресурс] / Электронная библиотека БГУ. – Режим доступа: http://http://elib.bsu.by/handle/123456789/18337 – Дата доступа 25.11.2019.

Практический раздел ЭУМК включает методические рекомендации и варианты заданий для проведения лабораторно-практических занятий на основе пособия

ГИС-картографирование и геохимический анализ ландшафтов. Практикум по геохимии ландшафтов : учеб.-метод. пособие / Н. В. Ковальчик, Н. В. Жуковская [электронный ресурс] / Электронная библиотека БГУ. – Режим доступа: elib.bsu.by/handle/123456789/229856 – Дата доступа 25.11.2019.

Раздел контроля знаний ЭУМК содержит материалы к контролю знаний и к аттестации, позволяющие определить соответствие результатов учебной деятельности обучающихся требованиям образовательного стандарта и учебно-программной документации по специальности. Данный раздел включает: варианты контрольных заданий, вопросы к экзамену, перечень заданий и контрольных мероприятий управляемой самостоятельной работы.

Вспомогательный раздел ЭУМК содержит ссылки на учебную программу по учебной дисциплине «Геохимия ландшафта».

ЭУМК по учебной дисциплине «Геохимия ландшафта» предназначен для преподавателей, студентов, аспирантов, магистрантов, изучающих географические науки.

Дисциплина «Геохимия ландшафта» раскрывает основы современного учения о геохимической структуре ландшафтов, закономерностях дифференциации химических элементов по природным зонам в природных и техногенных ландшафтах, систематике и способах геохимической оптимизации ландшафтов. В рамках дисциплины показаны основные закономерности миграции и концентрации элементов в ландшафтах; геохимическая классификация городских ландшафтов; особенности геохимической трансформации городских ландшафтов Беларуси. Раскрыты методические аспекты геохимической оценки ландшафтов для решения практических задач в области здравоохранения, сельского хозяйства, охраны окружающей среды, градостроительства.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1. Предмет геохимии ландшафта. Ландшафтно-геохимические процессы

Геохимия ландшафта – наука, изучающая миграцию и аккумуляцию химических элементов и соединений в ландшафтах различного генезиса (природных, техногенных, антропогенных). Биосфера Земли неоднородна по условиям миграции элементов, важной задачей науки является вычленение и картографирование таких участков – геохимических ландшафтов.

Основатель геохимии ландшафтов Полынов построил методологию науки, опираясь на почвоведение Докучаева и биогеохимию Вернадского. В 50-60-е гг. 20 века ландшафтно-геохимические методы стали активно применяться при поиске полезных ископаемых, развивается учение о водной, биогенной, атмосферной миграции, разрабатывается классификация геохимических ландшафтов. В 70-е гг. появляется методика исследования техногенных ландшафтов. В 2002 г. составлена карта «Геохимические ландшафты» в Национальном атласе Беларуси.

В геохимии ландшафта используется три методологических подхода: изучение процессов миграции химических элементов в различных ландшафтах; системный подход для исследования строения и картографирования геохимических ландшафтов; исследование поведения отдельных элементов в ландшафтной среде.

Применение системного подхода позволяет выявить минимальные по размеру контуры земной поверхности с однотипным химическим составом компонентов – элементарные ландшафты. По Полынову, каждый из них представляет «один определенный тип рельефа, сложенный одной породой, покрытый в каждый момент своего существования определенным растительным сообществом. Эти условия создают определенную разность почвы и свидетельствуют об одинаковом взаимодействии между горными породами и организмами». Полынов показал, что миграция элементов объединяет водоразделы, склоны, долины, водоемы в единое целое. *Геохимический ландшафт* – это парагенетическая ассоциация сопряженных элементарных ландшафтов, связанных между собой миграцией элементов.

Формы нахождения элементов в ландшафтной среде: горные породы и минералы, магматические расплавы, природные воды и газовые смеси, живое вещество, состояние рассеяния, коллоиды, техногенные соединения. Выделение коллоидной и техногенной форм стало необходимым в последнее время из-за усиления роли техногенеза в перемещении элементов на поверхности Земли.

Миграция химических элементов протекает в соответствии с факторами: внутренними, связанными со свойствами элементов, и внешними, которые в ландшафте определяются природными условиями. Определяющими являются температурный режим, условия увлажнения, концентрации растворов. Так, в тундровых ландшафтах низкие температуры при достаточном увлажнении за-

медляют геохимические процессы, поэтому подвижных форм элементов мало. Во влажных тропических лесах, наоборот, высокие температуры и обилие влаги способствуют активному гидролизу минеральных и органических соединений.

Химические элементы и соединения, определяющие условия миграции в ландшафте, называют типоморфными. Ими становятся элементы с высокими кларками, активно мигрирующие и способные к накоплению в данном ландшафте. Основные типоморфные элементы: Ca, H, Fe, S, Na, иногда - другие. Это позволяет говорить о кальциевых, кислых и глеевых ландшафтах. Химические элементы с низкими кларками не могут быть типоморфными из-за малых концентраций, они вынуждены мигрировать в предложенной типоморфными элементами обстановке.

Для характеристики геохимических процессов принято использовать понятие парагенных ассоциаций элементов, имея в виду их совместную концентрацию, например, с последовательным осаждением из вод. Хорошо изучены парагенные ассоциации элементов в донных отложениях, корах выветривания и почвах. Запрещенные ассоциации (отрицательный парагенезис) – это осаждение элементов, совместно невозможное в данной системе.

Миграция элементов в ландшафтах во многом обусловлена процессами выветривания земной коры. В геохимии выветривание рассматривается как вынос из пород и минералов преимущественно водных мигрантов (Ca, Mg, K, Na) и присоединение воздушных, в первую очередь H_2O, O_2, CO_2. Наиболее энергично выветривание происходит в почве, слабее - в коре выветривания и еще слабее в илах и водоносных горизонтах.

Самым распространенным процессом в коре выветривания является *гидратация*. Все вторичные минералы содержат сорбированную и кристаллизационную воду. Это глинистые минералы, гидроксиды Fe, Al и Mn, водные фосфаты (вивианит) и др. Максимальное количество химически связанной воды накапливается в наиболее зрелых ферралитных корах выветривания. Активно протекают процессы о*кисления,* особенно они характерны для выветривания пород, богатых сульфидами или обогащенных двухвалентными Fe и Mn.

Наиболее распространенными ландшафтно-геохимическими процессами, которые приводят к формированию в компонентах ландшафтов вторичных соединений, являются следующие: гуматогенез – накопление в почвах наиболее устойчивых органо-минеральных соединений; хелатогенез – образование и накопление ненасыщенных подвижных органоминеральных соединений (Fe, Al и Mn с фульвокислотами и бурыми гуминовыми кислотами); детритогенез – накопление полуразложившихся остатков растений с образованием лесных подстилок, торфа, сапропеля; оксидогенез – накопление в почвах вторичных минералов оксидов Fe, Al и Mn; кальцитогенез – образование и накопление кальцита в растительных остатках, почвах, на дне водоемов; галогенез - аккумуляция легкорастворимых солей; глеегенез – процесс в ландшафтах с водозастойным режимом, проявляется в образовании восстановленных соединений Fe, Mn, других элементов с переменной валентностью.

1.2. Миграция элементов в природных растворах. Геохимические барьеры

Миграционную способность элементов и их устойчивость в природных растворах во многом зависит от окислительно-восстановительных (ОВ) условий. Окислительно-восстановительный потенциал определяет уровень окисленности вод по показателю Eh. В природных водах Eh колеблется в пределах от +0,70 до –0,50 В. По ОВ условиям выделяют классы вод:

- кислородные – характерно присутствие свободного O_2, который окисляет органические вещества до CO_2 и H_2O. S, Cr, V, Se образуют растворимые анионы, которые обладают высокой миграционной способностью. Fe и Mn, наоборот, в окислительной обстановке образуют труднорастворимые соединения;
- глеевые (Eh ниже +0,40 В) – формируются там, где мало O_2 и много органических остатков, которые окисляются анаэробными бактериями. В водах появляются CH_4, H_2, Fe^{2+}, Mn^{2+} и другие ионы. Так как воды содержат мало SO_4^- то H_2S не образуется; высокую подвижность приобретают Fe, Mn, другие металлы, входящие в состав органических комплексов. Воды характерны для болот тундр, тайги, широколиственных лесов, влажных тропиков и лесостепи;
- сероводородные (Eh ниже 0) – бескислородные воды, богатых SO_4^{2-}, где анаэробные бактерии окисляют органику за счет восстановления сульфатов (десульфуризации), содержат H_2S. Fe и другие металлы не мигрируют в такой обстановке, потому что образуют труднорастворимые сульфиды. Цвет пород и почв - черный, серый, зеленый. Оглеение при этом не развивается. Сероводородные воды характерны для солончаков и илов соленых озер степей и пустынь, для побережий, подпитываемых морскими водами.

Щелочно-кислотные условия вод тоже определяют подвижность элементов в ландшафтах. Катионогенные элементы Mg, Ca, Sr, Ba, Cu, Zn, Cd, Fe, Mn, Co и др. образуют больше растворимых соединений в кислых водах и меньше – в нейтральных и щелочных. Осаждение зависит от концентрации металлов; при осаждении могут возникать устойчивые коллоидные растворы металлов, повышающие их миграционную способность, коррективы вносит также сорбция, образование комплексных ионов. В условиях тайги, тундры и других ландшафтов влажного климата подавляющая часть Fe, Ni, Cu, Zn мигрирует в составе комплексных органо-минеральных соединений. Организмы чувствительны к pH; для них наиболее благоприятна реакция, близкая к нейтральной. Поэтому органические соединения живых организмов и гумус обладают буферной способностью нейтрализовать сильнокислую и сильнощелочную среду. Таким образом, в ландшафте имеется механизм, с помощью которого формируется реакция вод, наиболее благоприятная для жизни. По щелочно-кислотным условиям выделяются ландшафтные воды:

- сильнокислые воды (pH < 3–4) распространены на участках залегания сульфидных руд, что ведет к образованию H_2SO_4. В сернокислых водах легко мигрирует большинство металлов, в том числе Fe, Cu, Al, Zn и др. В вулканических районах известны солянокислые воды;

- слабокислые воды (pH 4–6,5) распространены в гумидных ландшафтах, где в породах мало подвижных катионов, которые мигрируют металлы в форме гидрокарбонатов и комплексных соединений с органическими кислотами;
- нейтральные и слабощелочные воды (pH 6,5–8,5) менее благоприятны для миграции металлов, которые осаждаются в форме нерастворимых гидроксидов, карбонатов и других солей. Анионогенные элементы мигрируют сравнительно легко (Si, Ge, Ag, V, U, Mo, Se и др.). Такие воды особенно характерны для аридных ландшафтов, вод известняков и изверженных пород, морей и океанов.
- сильнощелочные воды (pH > 8,5) содержат соду (ионов Na, HCO_3, CO_3, OH). В щелочных водах легко мигрируют кремнезем, гуматы, AI, Mo. Большая группа элементов, соединения которых трудно растворимы в нейтральной и слабощелочной среде, в содовых водах опять обладают высокой миграционной способностью, так как в этих условиях возникают карбонатные растворимые комплексы (Cu, Zn, Be, Sc, Zr и др.).

Природные воды делят на семейства по показателю общей минерализации.

К ультрапресным водам (<0,1 г/л) относятся атмосферные осадки, поверхностные и грунтовые воды ландшафтов тундры, тайги. Воды не насыщены минеральными соединениями, обладают большой растворяющей способностью. Пресные воды (0,1–1 г/л) характерны для рек и озер гумидного климата, степных рек. Солоноватые воды (I–3 г/л) распространены в степях, пустынях и сухих саваннах. Они насыщены $CaCO_3$, $MgCO_3$ и частично $CaSO_4$. Поэтому растворяющая способность вод ослаблена, при повышении концентрации из них осаждаются труднорастворимые соли. К соленым водам (3–36 г/л) относятся преимущественно океанические воды. Рассолы (>36 г/л) характерны для соленых озер, иногда грунтовых вод степей и пустынь.

Геохимические барьеры – участки, где на коротком расстоянии происходит резкое снижение миграционной способности элементов, приводящее к их накоплению. В зависимости от направленности движения миграционного потока можно выделить барьеры латеральные и радиальные. Латеральный барьер стоит на пути миграции из одного элементарного ландшафта в другой. Например, между ландшафтами с окислительной и восстановительной обстановками. Радиальные барьеры связаны с вертикальным движением вод, локализованы внутри элементарных ландшафтов на границах раздела сред. Механические геохимические барьеры: аэродинамический (полоса лесонасаждений); гидродинамический (запруда на реке); фильтрационный (уплотненные горизонты почв). Биогеохимические барьеры: растительный ярус, гумусовый горизонт почв. Физико-химические барьеры: окислительные, сероводородные, глеевые, щелочные, кислые, испарительные, сорбционные, термодинамические.

Окислительные (кислородные) барьеры возникают на участках резкого повышения ОВ потенциала. Например, в зоне поступления глеевых или сероводородных вод, богатых Fe, Mn, Co, S, в кислородную среду. Распространены в равнинных ландшафтах с обилием органического вещества. В местах разгрузки глеевых вод происходит активное накопление гидроксидов железа и марганца с характерной ржаво-бурой окраской.

Сероводородные барьеры – там, где кислородные или глеевые воды встречают на своём пути сероводородную обстановку. На них накапливаются элементы, образующие с серой сульфидные соединения. В связи с высоким кларком Fe (4,65%) особенно широко распространены его сульфиды - пирит, гидротроиллит (FeS.n.H2O). Реже встречаются сульфиды Cu, PЬ, Zn.

Глеевые барьеры – на участках резкой смены кислородной обстановки глеевой в супераквальных ландшафтах лесной и степной зон. Для этих барьеров характерна концентрация Mo, U, Cu и др. элементов.

Щелочные барьеры – на участках резкого повышения pH среды в нейтральной, кислой и щелочной обстановках. В соответствии с общими законами миграции на них происходит накопление преимущественно катионогенных элементов, лучше мигрирующих в кислой среде: Fe, Mn, Ni, Co, Cu, в том числе загрязнители природной среды - Pb, Cd, Hg, As, U и др.

Кислые барьеры – на путях миграции элементов при резком снижении pH среды. На них накапливаются анионогенные элементы, такие как Si, Al, Mo, Be, Ga, Sc, Y, Zr, и др.

Испарительные барьеры – на участках ландшафтов, где накопление элементов обусловлено процессами испарения. Концентрируются наиболее растворимые элементы, которые подвижны в водах любого химического состава (Na, K, Rb, Cl и др.). В первую очередь осаждаются карбонаты Ca и Mg, затем – гипс (сульфат Ca), и – наиболее растворимые соли (хлориды Na и K).

Сорбционные барьеры – при фильтрации вод через среды, обладающие повышенной сорбционной способностью. Наиболее распространенные сорбенты в ландшафтах: глинистые минералы; гумус; рассеянное органическое вещество; торф; гидрооксиды Fe, Al, Mn; гели кремнезёма; частицы аэрозолей.

Термодинамические барьеры – в результате изменения температуры или давления, представлены в местах выхода подземных вод на поверхность, сезонного промерзания и оттаивания грунтовых вод.

1.3. Геохимические классификации химических элементов

В геохимии широко известна классификация Гольдшмидта (1924), основанная на аналогии с образованием оболочек Земли. По способности создавать химические соединения и концентрироваться в условиях биосферы все элементы разделены на 5 групп:

1. литофильные – в условиях биосферы образуют минералы, представленные оксидами, гидроксидами, солями кислородных кислот, их ионы имеют 8 электронную внешнюю оболочку. К ним относят 54 элемента, и в первую очередь, это Si, Ti, S, P, F, Cl, Al, Na, K, Ca, Mg;

2. халькофильные – для них характерно взаимодействие с S и ее аналогами - Se, Te. Внешняя оболочка имеет 18 электронную конфигурацию. Это - Zn, Pb, Cu, Cd, Ag, Fe и другие. Природные соединения представлены сульфидами;

3. сидерофильные – растворяются в железных расплавах и дают соединения и сплавы с Fe. Это – Ni, Co, C, P, Pt, Mo, Au, Sn. Они представлены атома-

ми, которые образуют переходные ионы с внешней оболочкой 9-17 электронной конфигурацией.

4. атмофильные – элементы земной атмосферы – H, N, C, O, He, Cl и др.

5. биофильные - концентрируются в живых организмах с образованием различных соединений – N, C, O, S, K, Mg, Fe, Cu и др.

В классификации Гольдшмидта много условного, наблюдаются взаимопроникновения (повторы). Например, железо обладает литофильными, халькофильными и биофильными свойствами. Классификация Гольдшмидта характеризует поведение элементов преимущественно в жидких фазах (растворах), а также распределение элементов между твердыми и жидкими фазами.

Классификация Вернадского группирует элементы по поведению в геохимических процессах:

1. благородные газы – He, Ne, Ar, Kr, Xe, образуют соединения с другими атомами исключительно редко, поэтому в природных химических процессах значительного участия не принимают;

2. благородные металлы – Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au редко образуют соединения; преимущественно присутствуют в форме сплавов;

3. циклические элементы – H, B, C, N, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Ag, Cd, Ba, (Be, Cr, Ge, Zr, Sn, Sb, Te, Hf, W, Re, Hg, Tl, Pb, Bi). Наиболее многочисленная группа, для каждого элемента характерен круг соединений, возникающих в ходе природных процессов;

4. рассеянные элементы – Li, Sc, Ga, J, Br, Rb, Hf, Ge, Se и др. – редкие элементы, не обладающие способностью к концентрированию в земной коре. Обычно входят в виде изоморфной примеси в минералы других элементов, J и Br образуют самостоятельных минералы;

5. редкоземельные элементы – La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tu, Yb, Lu, тяготеют к рассеянным. Основная черта – совместная миграция;

6. радиоактивные элементы – Po, Rn, Ra, Ac, Th, Pa, U.

Тяжелые металлы – группа химических элементов со свойствами металлов и значительным атомным весом либо плотностью. Используемым критерием может быть атомный вес элемента свыше 50 или плотность, равная или большая плотности железа (8 г/см^3). Термин тяжёлые металлы чаще всего рассматривается с медицинской и природоохранной точек зрения и поэтому учитываются не только физико-химические свойства элемента, но и его биологическая активность и токсичность (As).

Классификация Перельмана – это геохимическая классификация элементов по особенностям их миграции в ландшафтах и биосфере. Каждая группа представляет парагенную ассоциацию элементов, совместно мигрирующих и концентрирующихся на сходных геохимических барьерах. В пределах групп элементы расположены по величине кларков и роли в ландшафте. Первоначально элементы делятся на воздушные и водные мигранты. Воздушные мигрируют как в газообразном состоянии, в виде летучих соединений, так и с водными растворами. Водные в газообразном состоянии не мигрируют или мигрируют

слабо. Воздушные мигранты делятся на активные (образуют химические соединения) и пассивные (не образуют химических соединений. Не играют существенной роли в ландшафте). Водные мигранты делятся на катионогенные и анионогенные. Выделено 8 групп по интенсивности миграции в геохимических обстановках: элементы 1–3-й групп подвижны во всех обстановках, 8-й – не подвижны, 4–7-й – в обстановках разных типов. Подробная характеристика классификационных групп элементов приводится в учебнике Геохимия ландшафтов (2011).

1.4. Геохимические классификации ландшафтов

Мелко- и среднемасштабные ландшафтно-геохимические карты отражают условия гипергенной миграции элементов в мире или отдельных странах и областях. Каждый контур такой карты характеризуется единством зональных климатических условий, почвенно-растительного покрова, определенным типом рельефа и геологического строения, близким набором классов водной миграции.

Крупномасштабные карты (1 : 5000 – 1 : 100 000) содержат информацию об условиях миграции элементов в элементарных ландшафтах и катенах, их радиальной и латеральной структурах, системе геохимических барьеров, элементном составе почв, растений, вод. Они используются при оценке геохимических аномалий в рудных районах, городах и т.д.

Ландшафтно-геохимическое мелкомасштабное картографирование опирается на 2 основные классификации: М.А. Глазовской (разработанной на опыте составления карт Урала) и А.И. Перельмана (на опыте составления "Карты геохимических ландшафтов СССР" 1 : 20 000 в "Физико-географическом атласе мира"1964). Оба автора использовали сходные таксономические единицы, но критерии для их выделения различные.

Классификация Глазовской для элювиальных ландшафтов:

– тип ландшафта: по сходству показателей БИКа и скорости химических процессов. БИК определяет геохимию всех ярусов ландшафта. Объем вовлеченных в БИК элементов определяется массой живого вещества, характером его распределения между надземной и подземной частями, скорости минерализации органических остатков. Все эти показатели различаются по природным зонам, типам экосистем, названия которых и берутся за основу при выделении типа элювиальных ландшафта: например, соснового бора и др.

– подтип: по положению в рельефе и особенностям стока: элювиальный, трансэлювиальный, элювиально-аккумулятивный, аккумулятивно-элювиальный. Показателем интенсивности элювиального процесса является мощность зоны выщелачивания, в которой вещество с атмосферными осадками перемещается вниз. Соответственно выделены следующие ландшафты: пермацидные, в которых атмосферные воды периодически или постоянно достигают уровня грунтовых вод; импермацидные (ландшафты неполного профиля), где атмосферная влага проникает достаточно глубоко, но не достигает уровня грунтовых вод. Горизонты накопления привнесенных элементов - иллювиальные

горизонты; поверхностно-импермацидные ландшафты (ландшафты укороченного профиля), где перемещение элементов идет на небольшую глубину в пределах почвенного профиля. Над горизонтом грунтовых вод в ярусе катагенеза идет накопление легкоподвижных элементов.

– класс (по химическому составу исходных пород): бедные основаниями кремнеземистые; богатые основаниями кремне-глиноземные; богатые сульфидами; карбонатные; соленосные (хлоридные, сульфатные); углеродистые.

– подкласс (по генезису пород): ортоэлювий - из первичных (изверженных) пород, элементы в минералах этих пород активно переходят в раствор; параэлювий - из осадочных пород с различной устойчивостью к растворению: неоэлювий – переотложенные породы различного происхождения, например, моренные, делювий.

– род ландшафта (по геохимической историю ландшафта): наложенный ортоэлювиальный, вторичный ортоэлювиальный и т. д.

Пример названия элювиального ландшафта: пермацидный автономный неоэлювиальный ландшафт соснового бора на кварцевых песках.

Классификация Глазовской для супераквальных ландшафтов - те же единицы, что и для элювиальных, но критерии их выделения другие:

– тип супераквальных ландшафтов – при выделении учитывается окислительно-восстановительный режим. Окислительный режим имеют прирусловые ландшафты в поймах рек. Восстановительный режим имеют болота, приморские марши, притеррасная пойма. Во всех случаях уровень грунтовых вод находится в пределах почвенного профиля. Для ландшафтов с окислительно-восстановительным режимом характерна периодичность в смене окислительных и восстановительных условий в верхней части профиля почвы: заболоченные луга и леса в местных депрессиях. Кроме того, каждый из перечисленных типов ландшафтов выделяется в зависимости от минерализации вод. Пример типа супераквального ландшафта: заболоченный луг со среднеминерализованными водами.

– подтип – степень геохимической подчиненности в супераквальных ландшафтах: геохимически автономные, геохимически слабоподчиненные, геохимически подчиненные.

– класс – учитывается происхождение и состав пород, которые определяют химизм и минерализацию вод. Например, известняки способствуют формированию жестких карбонатных вод, ультраосновные породы являются источником повышенного содержания многих элементов. Однако не всегда можно разграничить породы, участвовавшие в формировании вод.

– род – разная геохимическая история: наложенный супераквальный, постсупераквальный, вторичный супераквальный. Наложенный развивается под влиянием изменения источника питания и химизма вод (например, превращение низинного болота в переходное и затем в верховое за счет нарастания мощности торфа и замены грунтового питания атмосферным). Постсупераквальные ландшафты образуются за счет понижения уровня грунтовых вод и перехода к недостаточному увлажнению. Это ландшафты осушаемых территорий, надпойменных террас. Вторичные супераквальные ландшафты образуются за счет

подъема грунтовых вод, например при строительстве водоемов, подпоре грунтовых вод. Они обычно формируются на месте бывших элювиальных ландшафтов.

Полное название: заболоченный луг с ОВ режимом и среднеминерализованными водами (тип), геохимически слабоподчиненный (подтип), на карбонатном аллювии (класс), вторичный супераквальный (род).

Классификация Перельмана (элементарные ландшафты). Наиболее крупными единицами являются ряды ландшафтов: абиогенный – без признаков жизни; биогенный – с наличием живых организмов; техногенный – преобразованный человеком. В земных условиях практически нет ландшафтов без признаков жизни, так как микроорганизмы вездесущи. Поэтому к абиогенным ландшафтам условно относят высокогорья и Антарктиду, к техногенным – отдельные участки коры выветривания, измененные техногенезом.

Группы ландшафтов выделяются по соотношению биомассы (Б) и ежегодной продукции (П): лесные, степные и луговые, пустынные, тундровые, примитивно пустынные. Ландшафты каждой группы встречаются в разных поясах. Внутри каждой группы различия по показателям биологического круговорота небольшие.

Тип ландшафта: по сходству показателей БИКа и скорости химических процессов. Так, в лесной зоне умеренного пояса выделяются темнохвойная тайга с подзолистыми почвами, светлохвойная тайга с дерново-палевыми почвами и др. Для характеристики типа ландшафта Перельман предложил количественный показатель емкости БИКа:

$К_{однородности}$ = отношение логарифма прироста (lg П) к логарифму биомассы (lg Б).

$К_{одн}$ тайги – 0,54–0,55, широколиственного леса – 0,58–0,60, лесов влажных тропиков – 0,64–0,66.

Семейство (по величине биомассы и прироста) - соответствуют подзонам в пределах географических зон, например, семейства северной тайги, средней и южной тайги.

Класс (по особенностям водной миграции в горизонте А почв, т.е. по набору типоморфных элементов.

Род (по особенностям миграции, определяемым рельефом). Выделяются - элювиальный (автономный), супераквальный и субаквальный, иногда дополнительные.

Вид (по генезису пород, определяющему миграцию второстепенных элементов). Так, среди элювиальных северных Ca-Na-степей можно выделить виды на диабазах, лессах и т.д. Число видов велико, и здесь используются геохимические классификации пород для целей геохимии ландшафта.

Классификация геохимических ландшафтов Перельмана. При классификации геохимических ландшафтов необходимо учитывать характер геохимического сопряжения между автономными и подчиненными элементарными ландшафтами. Полное сопряжение (катена) включает в себя элювиальный, супераквальный и субаквальный ландшафты, а неполное не содержит какого-то звена.

Обобщенная характеристика геохимических ландшафтов дается по особенностям центра ландшафта, он определяет черты всей катены. Если небольшие речная долина, озеро сопряжены только с одним автономным ландшафтом, то их можно считать составной частью этого геохимического ландшафта. Однако формирование химического состава донных отложений больших рек – явление очень сложное. И ландшафты их пойм, дельт являются самостоятельными единицами геохимической классификации, основанной на бассейновых принципах организации территории.

Для классификации геохимических ландшафтов используются те же таксоны, что для элементарных: ряд, группа, тип, семейство, класс, род, вид. Начиная с семейства, для каждого таксона может использоваться несколько характеристик. Это связано с различиями в геохимических сопряжениях: один и тот же автономный ландшафт может быть сопряжен с разными подчиненными ландшафтами. Так, в семействе средних черноземных степей подчиненные позиции могут занимать луговые болота или солонцы. В первом случае класс геохимического ландшафта будет характеризоваться как сопряженный Ca | Ca-Fe, а во втором случае – как Ca | Na-OH.

Проблема выделения рода геохимических ландшафтов состоит в анализе фактора рельефа. Выделяются три основных рода: 1) плоских равнин с замедленным водообменом, слабым эрозионным расчленением или без него (приморские низменности, аллювиальные равнины, вулканические плато); 2) эрозионные возвышенности, расчлененные плато, где поверхностный и подземный сток более энергичен, плоские поверхности чередуются со склонами; 3) горный, и сильно холмистый рельеф с наиболее энергичным водообменом, преобладают склоны. Виды геохимических ландшафтов выделяются на основании тех же критериев, что и виды элементарных ландшафтов, но большее значение приобретает генезис пород (лессовые, водно-ледниковые пески и др.)

Типологическая классификация природных геохимических ландшафтов Беларуси. В БГУ была разработана типологическая классификация природных геохимических ландшафтов Беларуси и создана карта «Геохимические ландшафты Республики Беларусь» для Национального атласа Беларуси масштаба 1 : 2 000 000. При проведении классификации учитывались разработки М. А. Глазовской, А. И. Перельмана, а также дополнения к ним, сделанные Н. К. Чертко. За основу была взята классификация А. И. Перельмана, при проведении классификации применялись следующие показатели: тип химизма ландшафтов, интенсивность биологического круговорота (БИК), объем фитомассы, щелочно-кислотные и окислительно-восстановительные условия, геохимический фон, типоморфные элементы, интенсивность миграции в пределах ландшафта, емкость поглощения химических элементов почвами. Для геохимической классификации природных ландшафтов использованы следующие таксономические единицы: тип, семейство, класс, род, вид.

За высшую таксономическую единицу классификации был принят тип, критерием для выделения которого служат растительные группировки и тип химизма растительности. Всего, на территории Беларуси выделено три типа геохимических ландшафтов: хвойно-лиственных лесов (Ca-N тип химизма) –

занимает около 80% территории, характерен для природных зон смешанных и широколиственных лесов; и два интразональных типа – луговых ландшафтов (N-Si тип химизма), распространенного фрагментарно и в поймах рек, и болотных ландшафтов (N тип химизма), наиболее широко распространенный на юге страны и тяготеющий, в основном, к плоским низменностям.

Следующей таксономической единицей классификации является семейство геохимических ландшафтов, выделяемое по величине фитомассы и интенсивности бика и отображаемое на карте при помощи цвета. В типе хвойно-лиственных лесов выделены следующие семейства: лиственных лесов (фитомасса больше 195 т/га, интенсивность бика 2–5) – локализовано в трех больших ареалах в пределах западной части Припятского Полесья, Витебской и Городокской возвышенностей, верховий р. Беседь; хвойно-лиственных лесов (фитомасса 180–195 т/га, интенсивность бика 2-6) – доминирующее в пределах типа, распространено южнее 53°30’ с.ш. и двумя соединяющимися компактными областями на севере Беларуси и Оршано-Могилевской возвышенности; хвойных лесов (фитомасса 165–180 т/га, интенсивность бика 5–8) – расположено на Оршанской и Минской возвышенностях и прилегающей к ним с севера Нарочано-Вилейской низменности, а также севернее р. Неман и на Костюковичской равнине.

В типе луговых ландшафтов выделено два семейства: пойменных лугов (фитомасса 15–20 т/га, интенсивность бика 2–3) и суходольных лугов (фитомасса 9–15 т/га, интенсивность бика 1–2). Первое имеет несколько большее распространение и приурочено к поймам рек, особенно ярко выражено в поймах Днепра, Припяти, Немана, Западной Двины, Березины, Сожа и др. Второе тяготеет, главным образом, к территориям водоразделов, хотя может соседствовать с пойменными лугами.

Наиболее распространенное среди типа болотных ландшафтов семейство низинных болот имеет самую большую фитомассу – 30–40 т/га, занимает около 90 % общей площади типа, встречается в пределах низменностей, особенно большие его площади в Белорусском Полесье. Семейства переходных (фитомасса – 20–30 т/га) и верховых болот (фитомасса менее 20 т/га) реже распространены и чаще отмечаются на водоразделах.

Классы ландшафтов выделены по типоморфным элементам и ионам водной миграции в сочетании с pH и Eh, на карте отображается штриховкой. В пределах Беларуси встречаются следующие классы:

- кислый (H^+), pH менее 5,5; Eh 200–700 мВ;
- кислый глеевый (H^+–Fe^{2+}), pH менее 5,5; Eh 0–200 мВ;
- кислый карбонатный глеевый (H^+–Ca^{2+}–Fe^{2+}), pH 5,5–6,5; Eh 0–200 мВ;
- карбонатный (Ca^{2+}), pH 6,5–7,5; Eh 200–700 мВ;
- карбонатный глеевый (Ca^{2+}–Fe^{2+}), pH 6,5–7,5; Eh 0–200 мВ.

Основной фон в ландшафтах Беларуси составляет кислый класс в элювиальных ландшафтах с дерново-подзолистыми почвами, меньшее распространение имеет кислый глеевый класс супераквальных ландшафтов на заболоченных почвах. Другие классы локализованы на небольших площадях: карбонатный

класс – на дерново-карбонатных почвах, кислый карбонатный глеевый класс – на торфяных почвах при подстилании мергелевых пород или при наличии жестких вод в профиле почвы, карбонатный глеевый класс – на дерново-карбонатных заболоченных почвах.

Типоморфные элементы и ионы водной миграции влияют на радиальную и латеральную структуру ландшафтов и миграцию химических элементов. А глубина расчленения и связанные с ней характер и скорость миграции химических элементов являются основными критериями, характеризующими род геохимических ландшафтов, отображаемых на карте римскими цифрами. Всего на карте выделено 4 рода:

I. Слабо расчлененный (0–5 м): слабая миграция с преобладанием аккумуляции химических элементов, приурочен к аллювиальным, озерно-ледниковым и водно-ледниковым низменностям (Белорусское Полесье, Принеманская и Полоцкая низменности), наибольшие площади занимает на юге республики.

II. Умеренно расчлененный (5–10 м): умеренная миграция с преобладанием химической денудации, более распространен в центральных и северных областях страны, связан с волнистыми и волнисто-увалистыми водно-ледниковыми и моренными равнинами, особенно хорошо выражены в Предполесье, типичный пример – Березинская равнина.

III. Средне расчлененный (10–15 м): активная миграция с преобладанием механической денудации, типичен для Белорусской гряды, приурочен к моренным возвышенностям, практически полностью отсутствует на юге республики (исключение – небольшой участок Мозырской гряды).

IV. Сильно расчлененный (более 15 м): весьма активная миграция с господством механической денудации, встречается довольно редко в пределах Минской, Новогрудской, Оршанской и Витебской возвышенностей.

Наименьшей таксономической единицей в классификации является вид геохимических ландшафтов, выделенный на основании данных по сорбции и накоплению в почве элементов, зависит от гранулометрического и литологического состава почвы, на карте показывается при помощи условных значков. На территории Беларуси представлены следующие виды ландшафтов, характеризующихся такими показателями:

– слабая сорбция и емкость аккумуляции химических элементов (1,5–5,0 мэкв/100 г), K_k>1 для Si, Al – наблюдается на песчаных и рыхлых супесчаных почвах, широко распространен в Полесье;

– средняя сорбция и емкость аккумуляции химических элементов (5,0–15,0 мэкв/100 г), K_k>1 Si, Mg, K, B – связан с суглинистыми почвами моренных и вторично моренных равнин и возвышенностей, характерен для Центральной Беларуси;

– сильная сорбция и емкость аккумуляции химических элементов (15–25 мэкв/100 г), K_k>1 Al, Fe, Ca, Mg, K, Mn, Cu, Co, B, Ba, Ti, V – приурочен к глинистым почвам, особенно к озерно-ледниковым ленточным глинам, доминирует в северной части республики;

– очень сильная сорбция и емкость аккумуляции химических элементов (более 25 мэкв/100 г) K_k>1 Ca, P, S, Zn, B, I, Ni, V, Sr – образуется на торфяных почвах низинного типа, распространение практически аналогичное семейству низинных болот.

1.5. Геохимическая структура ландшафтов. Геохимические барьеры

В основу выделения геохимической структуры ландшафтов положен системный подход. Реализуется он в сопряженном анализе химического состава 1) компонентов элементарного ландшафта 2) однотипных компонентов всех ЭЛГС в катене. То есть кроме покомпонентных кларков химических элементов, которые являются «геохимическим фоном» в породах, почве, растениях, водах, появляется возможность показать их соотношение в ландшафте. Для этого вводится понятие «фоновой геохимической структуры», под которой понимают соотношение содержаний элементов между подсистемами-компонентами, выраженное через коэффициенты.

В вертикальном профиле ЛГС фоновая структура описывает соотношение концентраций элемента или вещества в подсистемах вода-порода (Кх), почва-растение (КБП) и др. Для того, чтобы описать процессы выноса или накопления элементов в системе почва-порода, используют коэффициент радиальной дифференциации (R): R = Ci / Спор., где Ci – содержание элемента в одном из почвенных горизонтов, Спор. – его содержание в почвообразующей породе. В автономных ландшафтах при условии однородности литогенной основы рассчитывается эллювиально-аккумулятивный коэффициент (Кэа). Радиальное распределение элементов зависит от содержания в почвенных горизонтах органического и минеральных веществ, гранулометрического состава, Щ-К и О-В условий.

В горизонтальном профиле ЛГС фоновая почвенно-геохимическая структура описывается через коэффициент латеральной миграции (L), отражающий соотношение элементов в почвенных горизонтах геохимически сопряженных элементарных ландшафтов: L = Ci / Савт., где Ci – содержание элемента в почве геохимически подчиненного ландшафта, Савт. – его содержание в почве автономного ландшафта. При характеристике фоновой структуры катен с однородной литогенной основой используют коэффициент местной миграции (Км), аналогичный коэффициенту L.

Геохимическая структура отражает закономерное латеральное и радиальное распределение элементов в ландшафтно-геохимической системе, вызванное их перераспределением под воздействием факторов миграции. При изучении геохимической структуры учеными были сформулированы 2 правила. 1) Каждый ландшафт имеет индивидуальную, присущую только ему геохимическую структуру: радиальную и латеральную. По соотношению содержания элементов в системах «почва–порода», «почва–растения», «почва–воды» и т. д. создается модель радиальной структуры изучаемого элементарного ландшафта. А индивидуальность геохимического ландшафта определяется латеральной геохими-

ческой структурой, которая описывает взаимодействия потоков миграции химических элементов в системах типа «автономный–подчиненный ландшафт». 2) Правило типологичности ландшафтов – генетически однотипные ландшафты, сформировавшиеся в близких физико-географических условиях, имеют сходную геохимическую структуру. Эта закономерность обусловлена однотипными процессами взаимодействия между компонентами ландшафтов, сформировавшихся на одних и тех же породах в пределах единых природных зон. Используя это правило, можно интерполировать результаты исследования геохимической структуры, полученные на ключевых участках, на другие территории, не прибегая к дополнительным исследованиям. Однако геохимическую структуру ландшафтов нельзя рассматривать как статичную, поскольку условия миграции элементов меняются под воздействием природных и техногенных факторов. Например, в случае осушения торфяника меняется геохимическая структура всей водосборной территории.

Путем R- и L-анализа для ландшафтов Беларуси выполнена классификация геохимических структур с делением на группы, типы и виды.

- Группы - по направлению формирования выделены латеральная и радиальная.
- Типы - по месту формирования структуры элементарного ландшафта. Автономный тип характерен для водораздельных пространств, транзитный – для склонов, аккумулятивный – для депрессий и пойм рек.
- Виды - по характеру варьирования содержания отдельных элементов в почвах в пределах профиля и катены.

Обобщенную характеристику геохимической структуры почвенного профиля или катены определяют по преобладающим структурам элементов (элементным структурам).

Элементная структура показывает соотношения содержания отдельного элемента и может быть выражена графически. По коэффициентам латеральной и радиальной дифференциации можно схематично показать интенсивность концентрации или рассеяния элемента. Радиальная элементная структура показывает распределение каждого элемента в вертикальном профиле системы «почва–порода». Латеральная элементная структура показывает распределение элемента в гумусовом горизонте по всей протяженности катены.

Исследование показало, что всего несколько видов наиболее характерных структур описывают условия миграции и концентрации элементов в ландшафтах Беларуси: латеральных – 5 и радиальных – 8 видов. Виды латеральных структур:

- восходящий, или асцендиальный, – содержание элемента в пределах катены возрастает от элювиального ландшафта к супераквальному;
- нисходящий, или дисцендиальный, – содержание элемента убывает в пределах катены;
- депрессионный – содержание элемента минимально в трансэлювиальном ландшафте;

- пикообразный – максимальное содержание элемента в трансаккумулятивно-элювиальном ландшафте;
- равномерный – химические элементы равномерно распределяются в пределах ЛГС.

Для большинства химических элементов в условиях гумидного климата и при однородном (монолитном) строении катены характерен восходящий (асцендиальный) вид латеральной структуры, когда наибольшая их аккумуляция наблюдается в нижних звеньях катены. Такая закономерность может проявляться и при гетеролитном литологическом строении почвенных горизонтов. Степень контрастности восходящей структуры биофильных элементов высока при наличии торфяно-болотных почв в супераквальных ландшафтах.

При слабой механической миграции и вогнутых формах склонов возможно накопление элементов на склонах катены (в элювиально-трансаккумулятивном ландшафте) и формирование структуры пикообразного вида. Он наиболее характерен для элементов, тесно связанных с минеральной частью почвы и мигрирующих в составе глинистых частиц, для K, B, Co в моренно-озерном и вторично-моренном ландшафтах. Если же в ландшафте со слабой механической миграцией нет предпосылок для накопления элемента на склонах, то наиболее вероятным видом структуры будет дисцендиальный, что характерно для Si, Al, т.к. при однородном строении катены и слабом уклоне в рельефе устойчивые соединения практически не выносятся из элювиальных ландшафтов. Это особенно относится к плоским ландшафтам, сформировавшимся на песчаных породах, встречается также среди песчаных бугров и холмов. Для многих элементов в условиях слабой расчлененности рельефа на однородной породе характерен равномерный вид структуры (Fe, S). А при пологой вершине и крутых склонах холмов, сложенных однородными рыхлыми породами, когда интенсивно развивается плоскостной смыв, формируется депрессионный вид структуры для элементов, связанных гумусом и коллоидной фракцией почв (Mg, K).

Важная роль в формировании катенарной структуры элементов принадлежит формированию латеральных барьеров – участков с контрастными геохимическими обстановками на границах сопряженных элементарных ландшафтов. Кальциевый (карбонатный) геохимический барьер приурочен к ландшафтам, почвенные горизонты которых сформированы на карбонатных породах или в условиях подтока жестких вод, насыщенных ионами HCO^{3-} и Ca^{2+}. На кальциевом барьере осаждаются прежде всего химические элементы 2 и 12 групп: Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Zn, Cd, Hg. На территории Беларуси площадной кальциевый барьер занимает наименьшую площадь. Приурочен к обогащенным карбонатами поверхностным отложениям различного возраста и генезиса: дочетвертичным отложениям карбонатных пород (мел, известняк, мергели), четвертичным карбонатным моренным и лессовидным отложениям. Относительно небольшие и консолидированные участки встречаются в долинах рек Свислочь и Россь (бассейн р. Неман) на западе Беларуси. Наибольшие площади барьера отмечены в полесских ландшафтах (аллювиальных террасированных и пойменных), приуроченных к насыщенным обменными основаниями дерновым и дерново-карбонатным заболоченным почвам.

Механический латеральный барьер возникает в результате резкого снижения механической миграции вещества, определяется плотностью пород. На механическом барьере, как правило, высоко содержание коллоидных частиц и физической глины. Поэтому механический барьер обычно сочетается с сорбционным. Коллоидные минеральные частицы имеют преимущественно отрицательный заряд, что способствует концентрации катионов. Дополнительное наличие органогенного сорбционного барьера (гумуса) создает предпосылки для сорбции и концентрации широкого спектра катионогенных и анионогенных элементов (V, Mo, Co, Ni, Zr, Ti, Cr, Cu, Pb, Zn, Cd). Характерен для севера Беларуси. Почти вся территория распространения барьера приурочена к ландшафтам на озерно-ледниковых глинах в сочетании с моренными глинами и суглинками, расположе-на в Витебской области в виде большого контура с сильно изрезанными границами. Небольшие контуры распространения барьера встречаются на Ошмянской возвышенности и в районе Логойска.

Сорбционный геохимический барьер встречается повсеместно, но контрастнее выражен в ландшафтах на глинистых, тяжело- и среднесуглинистых породах с сильно гумусированными почвами. Сорбируются практически все химические элементы, встречающиеся в растворе в ионной форме, особенно с высоким коэффициентом водной миграции – неметаллы, щелочные и щелочноземельные элементы. С сорбцией связывают буферную емкость ландшафта. Однако часть элементов, концентрирующихся на барьере, находится в обменной форме и может поступать в биологические объекты. Сорбционный барьер об-разует крупные участки распространения в пределах Полоцкой низменности вдоль реки Дисна до впадения в Западную Двину и далее вниз по ее течению, где барьер сочетается с механическим. На остальной территории Беларуси сорбционный барьер встречается, как правило, в виде вытянутых узких участков по долинам рек.

Органогенный геохимический барьер обусловлен сорбционными и комплексообразующими свойствами органического вещества и тяготеет к заболоченным долинам крупных рек и их притоков. Накапливает широкий спектр биофильных химических элементов (Mg, K, Co, Cu и др.). На севере Беларуси площадь распространения барьера меньше, чем в центральной и южной частях.

Восстановительный глеевый геохимический барьер выражен в супераквальных и субаквальных ландшафтах, где формируются торфяные и минеральные заболоченные почвы, донные отложения со слабым доступом свободного кислорода или других окислителей. Такие условия содержат возможности для осаждения V, Mo, Cr, Se, U, Re. География данного барьера более обширна, чем органогенного. Барьер характерен практически для всех ландшафтов, но прежде всего для низменных, в которых он занимает доминирующую позицию.

Окислительный площадной барьер наиболее выражен в автономных ландшафтах, которые приурочены к положительным формам рельефа. На нем концентрируются практически все элементы с переменной валентностью (Fe, Mn, Co и др.), и металлы, образующие устойчивые оксиды в большинстве геохимических обстановок: Al, Ti, Zn, Ta, W, Hf, Te, Ce, Nd, Y, La, Ga, Sc, In, Bi, Th, лантаниды. Окисленная форма элементов слабо доступна для корневой систе-

мы растений при условии свободного доступа кислорода в почву. По площади он занимает доминирующее положение фактически на всей территории Беларуси в автоморфных условиях.

Радиальная геохимическая структура ландшафтов Беларуси отражает закономерности распределения химических элементов по генетическим горизонтам почв и пород. Выделено 8 видов радиальных структур:

- равномерный (химические элементы по профилю почв распределяются равномерно);
- гумусовый (гумусово-аккумулятивный) – накопление происходит в гумусовом горизонте почвы (для торфяных почв более корректно органогенный);
- гумусово-иллювиальный – в гумусовом и иллювиальном горизонтах;
- гумусово-элювиальный – в гумусовом и элювиальном горизонтах;
- элювиально-иллювиальный – в подзолистом и иллювиальном горизонтах;
- лессивированный – вынос элементов вниз по профилю с постепенным увеличением их содержания, т. е. в материнской породе содержится элемента больше, чем в вышележащих почвенных горизонтах (для торфяных почв – псевдолессивированный).

Формирование радиальной почвенно-геохимической структуры в элементарном ландшафте зависит от многих факторов: направления почвообразовательных процессов, которые формируют почвенный профиль, гранулометрического и минералогического состава почв; распределения органического вещества, содержания карбонатов, глинистых минералов, полуторных оксидов, О-В и Щ условий, уровня грунтовых вод.

Равномерный вид радиальной структуры, как правило, характерен для слабоподвижных элементов в почвах на одночленной породе, без смены О-В обстановки с глубиной. Характерен для кремния и алюминия в автоморфных почвах в холмисто-моренно-эрозионных ландшафтах.

Гумусовый (органогенный) – один из наиболее распространенных видов элементных радиальных структур, формирование связано с количеством гумуса, способного к сорбции элементов, особенно биофильных. Максимальная контрастность R свойственна супераквальным ландшафтам с дерновыми заболоченными и торфяно-болотными почвами. Аналогичный вид структуры формируется в почвах ТЭ-А ландшафтов за счет намыва верхних горизонтов.

Иллювиальный вид структуры характерен для почв с ярко выраженной аккумуляцией оксидов алюминия и железа в иллювиальном горизонте. Он проявляется также на почвах с двучленным строением, когда рыхлые породы на небольшой глубине подстилаются плотными, к примеру, водно-ледниковые супеси моренными суглинками. В таком случае структура может быть обусловлена изначально разным содержанием элемента, как следствие различного генезиса и различного гранулометрического состава. На контакте пород формируется сочетание механического и сорбционного барьеров, способное к аккумуляции широкого спектра элементов. Кроме того, данный вид структуры выражен на почвах с интенсивным образованием Fe-Mn ортштейнов, способных к концен-

трации ряда тяжелых металлов, в том числе Cr, Pb. Формированию данного вида структуры способствует подзолистый процесс почвообразования с выносом большинства подвижных соединений из верхних горизонтов и их частичной аккумуляцией в иллювиальных горизонтах.

Одновременно в подзолистом горизонте формируется элювиальный вид структуры для некоторых элементов – прежде всего для Si, Al, за счет концентрации устойчивых в данной геохимической обстановке соединений.

Гумусово-иллювиальный вид радиальной структуры получил широкое распространение в автономных и ТЭ-А ландшафтах, особенно с заболоченными почвами суглинистого состава (Al, Fe, Ca, Mg). Также данный вид структуры может быть присущ почвам с двучленным строением, при условии подстилания легких по гранулометрическому составу пород более тяжелыми и интенсивного накопления элемента в горизонте А.

В ряде ландшафтов с промывным водным режимом выделен лессивированный вид радиальной структуры, связанный как с одноименным процессом почвообразования на лессовидных породах, так и с гетеролитностью пород почвенного профиля. Лессивирование часто проявляется на дерново-подзолистых почвах, при условии достаточно глубокого залегания грунтовых вод и отсутствия в почвенном профиле значимых барьеров. Данный вид структуры возможен также для торфяно-болотных почв за счет контраста содержания элементов в торфяных горизонтах и подстилающих минеральных породах, что установлено для Si, Al. Поскольку здесь лессиваж не характерен, применяется термин псевдолессивированный вид структуры.

Гораздо меньшее распространение получили гумусово-элювиальный и элювиально-иллювиальный виды радиальной геохимической структуры. Эти виды часто связаны с неоднородностью пород по гранулометрическому и минералогическому составу, оглеением, эрозионными процессами, агротехногенным воздействием, техногенным перемещением или перемешиванием горизонтов и т. д.

На территории Беларуси выделено 15 видов сочетаний радиальных геохимических барьеров, распространение которых имеет свои особенности.

Гумусово-окислительный барьер – наиболее распространенное сочетание радиальных геохимических барьеров. Образуется в элювиальных ландшафтах с легкими по гранулометрическому составу (пески, супеси) одночленными почвами на плакорных участках. Представлен практически повсеместно.

Гумусово-окислительно-механический барьер формируется в ландшафтах с почвами более тяжелого состава (суглинки) или почвами двух- или трехчленного строения, например, с покровом водно-ледниковых или лессовидных отложений нижележащих мо-ренных глин и суглинков.

Гумусово-окислительно-механическо-сорбционный барьер сформировался на небольших участках в Белорусском Поозерье. Образуется в автоморфных условиях на тяжелосуглинистых и глинистых почвах.

Гумусово-переменно-окислительно-восстановительный барьер образуется на почвах легкого гранулометрического состава (пески) с временным избыточным увлажнением.

Гумусово-механическо-переменно-окислительно-восстановительный барьер формируется в условиях временного избыточного увлажнения в ТЭ-А, А-Э ландшафтах (на склонах, в западинах).

Гумусово-механическо-сорбционно-переменно-окислительно-восстановительный образуется на временно избыточно увлаженных тяжелосуглинистых и глинистых почвах. Значительное распространение получил в Белорусском Поозерье.

Гумусово-восстановительно-глеевый барьер развивается на мощных песчаных и супесчаных почвах в условиях избыточного увлажнения. Барьер широко распространен на заболоченных минеральных почвах Полесья и Центральноберезинской низменности.

Гумусово-восстановительно-глеево-механическо-сорбционный барьер образуется на глеевых тяжелосуглинистых и глинистых почвах, распространен на озерно-ледниковых глинах Полоцкой низменности.

Гумусово-восстановительно-глеево-дисперсионно-сорбционный барьер характерен для пойменных минеральных заболоченных почв, обогащенных органическим и илистым веществом и обладающих высокой емкостью поглощения. Отмечен для пойм Днепра, Припяти, Березины, Сожа и других рек.

Органогенно-восстановительно-глеевый барьер формируется на торфяно-болотных почвах. Наиболее широко представлен в Полесье.

Разнообразие геохимических структур как характеристика ландшафта оценивается по частоте встречаемости элементных структур того или иного вида. С помощью изучения геохимической структуры можно дать рекомендации для оптимальной организации ландшафта, изучения ландшафтно-геохимического разнообразия, улучшения и сохранения природной среды.

1.6. Геохимия лесных ландшафтов

Лесные ландшафты формируются в условиях избыточного увлажнения с промывным водным режимом и широко представлены во всех климатических поясах. Основные условия миграции: активно выражена водная миграция элементов, но их выносу противостоит биологический барьер.

Экваториальные, субэкваториальные и тропические леса, характеризуются отсутствием холодного сезона. Осадков выпадает от 1000 до 10000 мм, которые в течение года распределяются равномерно. Такие условия ускоряют геохимические процессы, направленные на высвобождение элементов из породы и миграцию за пределы ландшафта. Основным геохимическим барьером на пути ускоренной миграции элементов становится корневая система растений, а также сорбционный барьер, приуроченный к породам тяжелого состава.

Ландшафты субтропических лесов по условиям миграции элементов в субтропиках делятся на два типа: влажные леса и сухие (средиземноморского типа) субтропические леса. Значительные колебания гидротермических условий в течение года приводят к изменению интенсивности миграции элементов. В сухих субтропических лесах выпадает 400–700 мм осадков, преимущественно зимой.

Гидротермические условия широколиственных лесов весьма разнообразны. Средняя температура самого холодного месяца изменяется от –10 до +3 °С, самого теплого – от 17 до 22 °С. За год выпадает от 500 до 1000 мм осадков. Доминирует слабопромывной водный режим почв. Геохимические процессы имеют сезонную направленность. В весенний период преобладает механическое перемещение элементов с талыми водами. В вегетационный период вода, насыщенная CO_2, активно гидролизирует минеральные соединения почв и пород.

На долю хвойных лесов бореального пояса приходится более трети всех лесов Земли. Гидротермические условия контрастны. Годовое количество осадков – 250–750 мм при испаряемости 400–700 мм в год. Господствует промывной водный режим. Значительная часть хвойных лесов Евразии и Северной Америки находится в зоне вечной мерзлоты, где формируются специфические условия миграции и концентрации элементов. Недостаток тепла летом замедляет разложение хвои, снижает активность геохимических процессов. Замедленный метаболизм веществ удлиняет жизнь древесных растений. Ель европейская в ландшафтах южной тайги живет 200, а на границе с тундрой – до 400 лет.

Генезис и тип химизма коры выветривания, типы вторичных минералов, аккумуляция элементов в виде устойчивых минералов и сорбированных форм. В лесных ландшафтах экваториального, субэкваториального и тропического поясов кора выветривания представлена магматическими, метаморфическими и осадочными породами и достигает мощности нескольких десятков и даже сотен метров. Породы основного состава в процессе гипергенеза дают глинистые продукты, а кислые, содержащие много кварца, – песок. Основу коры выветривания составляют устойчивые оксиды железа и алюминия, которые определяют тип химизма коры выветривания: ферритная (Fe), ферраллитная (Fe, Al), аллитная (Al). В результате геохимических процессов неустойчивые первичные минералы активно трансформируются в более устойчивые глинистые минералы. Среди них преобладают каолиниты (до 70 % всех глинистых минералов). На карбонатных породах устойчивы монтмориллониты. По сравнению с исходной породой в коре выветривания увеличивается содержание оксида железа до 30 %. На глинистых частицах образуются пленки гидроксида железа, которые устойчивы к механическому воздействию. Они цементируют породу в латеритную плиту мощностью до 4-5 м и более. В латеритных панцирях могут аккумулироваться гидроксиды алюминия, марганца, редкие и рассеянные элементы (Be, V, Ni, Co, Zr, Ti, Cr, Ni, Ge, Nb, Te, As). Изменение окраски коры выветривания зависит от степени гидратации оксидов железа, чем она ниже, тем больше выражен красный цвет. Содержание оксида алюминия в коре выветривания увеличивается до 50 %. Гидраты алюминия выпадают из раствора в виде аморфного геля и обезвоживаясь образуют гиббсит, повышенное содержание которого характерно для древних латеритных кор. Алюминий с кремнием кристаллизуется на силикатных породах в форме каолинита, на породах с кальцием - монтмориллонита. Кремнезем встречается в коре выветривания в виде золя, а при дегидратации образует халцедон и опал. Среди редких и рассеянных элементов в коре выветривания и в почвах аккумулируются Ti, Ga, Zr, которые об-

разуют устойчивые минералы. Из коры выветривания сравнительно быстро выносятся Na, Cl, S, Ca, Mg, K, Mn, Ba и др.

Кора выветривания субтропиков имеет меньшую мощность. По соотношению SiO_2 : R_2O_3 в илистой фракции породы делятся на ферраллитные и сиаллитные. Среди глинистых минералов преобладают каолиниты. Содержание полуторных оксидов составляет 30–50 % (в сухих – меньше). Химические элементы мигрируют преимущественно вниз по профилю, в сухих лесах – вверх. Во влажных лесах реакция кислая или слабо кислая, в сухих – близкая к нейтральной. В карбонатных породах состав ила гидрослюдисто-монтмориллонитовый. Образование глинистых минералов увеличивает сорбцию элементов.

Кора выветривания зоны широколиственных лесов имеет небольшую мощность и представлена разными по генезису породами преимущественно суглинистого состава. Среди глинистых минералов преобладают гидрослюды, реже - монтмориллонит, с примесью вермикулита, хлорита и каолинита. Основу химического состава пород составляют кремний и алюминий, поэтому кора выветривания сиалитная. Характерно перемещение глинистых частиц вниз и оглинивание профиля почв и коры выветривания - лессиваж.

Наиболее выщелочены аллювиально-делювиальные суглинистые породы. Карбонатные глины, элювий гранита и базальта содержат больше полуторных оксидов. Содержание других элементов определяется исходным составом породы и степенью их растворимости.

Кора выветривания зоны хвойных лесов маломощная, представлена элювием, неоэлювием ледниковых отложений, параэлювием (морские отложения). Минералогический и химический состав пород разнообразный. Из вторичных минералов присутствуют: кремнезем, гидроксиды железа, свободный глинозем, оксиды марганца, фосфаты железа (вивианит и др.), карбонаты (кальцит). В супераквальных ландшафтах образуются гидрослюды, меньше монтмориллонит, каолинит. Соединения железа и марганца мигрируют в виде комплексных соединений с органическим веществом, фосфором и другими элементами. Индикатором выпадения гидроксидов железа из раствора является «маслянистая» пленка на поверхности водоема. Состав таких пленок сложный: двух- и трехвалентное железо, кальций, органическое вещество. В супераквальных ландшафтах, где реакция близкая к нейтральной, образуется вторичный минерал сидерит. В комплексные соединения оксидов Fe, Mn, Si, Al редкие элементы входят изоморфно, в виде акцессорных примесей и в сорбированной форме, количественное их содержание зависит от генезиса пород. Например, в морских глинах марганца в 20 раз больше, чем в древнеаллювиальных песках, иода – в 50 раз.

Поведение элементов в почвах лесных ландшафтов определяется кислой реакцией среды, фульватным составом гумуса, промывным водным режимом. Результатом является вынос за пределы профиля щелочных и щелочноземельных металлов, закрепление элементов на почвенно-геохимических барьерах.

В почвах экваториальных, субэкваториальных и тропических лесов содержание гумуса в почвах низкое – 1–4%. В жидкой фракции почв господствуют фульвокислоты. В соединении с полуторными оксидами (Fe_2O_3 + Al_2O_3) они

образуют хелаты, растворимость которых определяется величиной pH, концентрацией раствора, соотношением оксидов и фульвокислот (6 : 1 – нерастворимы в тропиках). Гуминовые кислоты, связанные с кальцием и другими двухвалентными металлами, на поверхности первичных минералов образуют пленки и задерживают их выветривание. Характерен вынос за пределы профиля активных металлов и значительной части кремния. В лесных почвах тропиков преобладают положительно заряженные частицы коллоидов (базоиды), поэтому характерна аккумуляция анионогенных элементов (S, P, N, Se, Ti, V и др.). Мало сорбируется катионов, так как ацидоиды представлены преимущественно гумусовыми соединениями, которых меньше, чем базоидов (коллоидные частицы гидроксидов алюминия и железа). Таким образом в коре выветривания и почвах наблюдается тенденция к уменьшению содержания химических элементов.

В почвах субтропических лесов растительные остатки при разложении дают 4–9 % гумуса, в котором преобладают фульвокислоты, растворимые фульваты железа и алюминия мигрируют по профилю и осаждаются в иллювиальном горизонте. Гуминовые кислоты находятся в осажденном состоянии и вместе с минеральными коллоидами создают сорбционный барьер для редких и рассеянных элементов. В коричневых почвах непромывной водный режим способствует формированию нейтральной или слабощелочной реакции, в составе гумуса преобладают гуминовые кислоты (Сг:Сф 1,2–1,5). Характерно оглинивание, среди глинистых минералов преобладают монтмориллонит и гидрослюда. Содержание в почве B, Co и Cu выше кларка, Mn, Zn, Mo – ниже.

В почвах широколиственных лесов реакция почв слабокислая, вниз по профилю близкая к нейтральной. Содержание гумуса 2,5–8,0 %, преобладают фульвокислоты. Аккумулируются аморфные и органо-минеральные формы железа и алюминия, в гумусовом горизонте аккумулируются Mn, Cu, Co, Zn.

В хвойных лесах фульвокислоты с минеральными соединениями образуют растворимые органо-минеральные комплексы, которые мигрируют вниз по профилю. Наблюдается два горизонта аккумуляции элементов: гумусовый и иллювиальный. Первичные минералы преобразуются медленнее по сравнению с аналогичными процессами в ландшафтах тропических и экваториальных лесов, что объясняет преобладание гидрослюд в группе вторичных глинистых минералов, реже встречается монтмориллонит, каолинит, вермикулит. В мерзлотно-таежных почвах сильное промерзание зимой и иссушение в теплый период вызывают движение влаги с растворенными соединениями к поверхности почвы. Периодически промывной водный режим способствует миграции химических элементов к мерзлотному слою. В итоге элементы аккумулируются в гумусовом и надмерзлотном горизонтах почв. По профилю почв содержание полуторных оксидов, азота, фосфора, калия высокое, но использования их растительностью низкое.

Почвенно-грунтовые и речные воды в пределах тропиков имеют, как правило, низкую минерализацию и относятся к ультрапресным, а по химическому составу – к гидрокарбонатным и гидрокарбонатно-кремниевым. В ландшафтах влажных субтропических лесов ультрапресные или пресные с минерализацией 0,1–0,3 г/дм^3, по химическому составу гидрокарбонатные, местами гидрокарбо-

натно-кремниево-кальциевые. Воды ландшафтов сухих субтропиков гидрокарбонатно-кальциевые с минерализацией 0,2–0,7 г/дм^3 и повышенным содержанием сульфат-иона. Воды ландшафтов широколиственных лесов имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав, пресные по минерализации (0,3–0,4 г/дм^3). Особенности: выше концентрация элементов в водах зимой и летом в межень, меньше – в весенний или летний паводок; содержание органического вещества в воде в период вегетации больше; грунтовые воды более минерализованы, чем поверхностные. Воды ландшафтов хвойных лесов гидрокарбонатно-кальциевые, в северной тайге – гидрокарбонатные, местами гидрокарбонатно-кальциево-магниевые. Минерализация вод колеблется в широких пределах 20-500 мг/дм^3, характерно высокое содержание растворимых органических соединений. В озерах происходит аккумуляция осадков на дне водоемов. Образуются кремнеземистые и известковые сапропели, озерные железные руды, карбонатно-силикатные илы.

Биомасса ландшафтов экваториальных и тропических лесов колеблется от 130 (мангры) до 1700 т/га (гилеи). Годовой прирост до 100 т/га, зеленая и многолетняя надземная часть прироста близки - 47 и 42 %. Высокая концентрация элементов в многолетней надземной части говорит о наличии ярко выраженного биологического барьера. Зольность элементов в биомассе незначительна - 1,5 %. Скорость аккумуляции элементов в молодых органах растений больше, чем в многолетних. Растения усваивают за год в 4 раз больше элементов, чем их выносится с ионным стоком. Это обстоятельство способствует удержанию подвижных мигрантов. Интенсивность БИКа высокая - около 0,1. Ежегодно опадает до 5 % биомассы. С опадом возвращается на 0,5 т/га меньше зольных элементов, чем потребляется приростом, азота в 2 раза меньше. Зольные элементы и азот образуют в опаде и древесной биомассе ряд: Si > N > Ca > Mg > Fe > > Al > K > S > Mn > P > Na > Cl, поэтому тип химизма растений азотно-кремниевый.

Ландшафты влажных субтропических лесов характеризуются следующими показателями БИКа: биомасса 400 т/га; зольность близка к показателю для тропического леса: листья 3,9 %, многолетняя надземная часть 1,4 %. С опадом возвращается в почву зольных элементов в 2 раза меньше, чем в лесных ландшафтах тропиков. Меньше в опаде щелочных и щелочноземельных элементов для нейтрализации кислой реакции. Зольные элементы и азот образуют следующий ряд возврата: N > Ca > Si > K > Mg > S > Al, Fe > Mn, Cl, Na. тип химизма растений кальциево-азотный. В сухих субтропических лесах биомасса меньше (120–250 т/га), накапливается больше подстила, так как опад не успевает разложиться в течение года. Надземной частью растений в круговорот вовлекается больше магния, подземной – калия. Кальций, кремний и алюминий распределяются равномерно. БИК кальциево-азотный, среднезольный, интенсивный.

БИК в широколиственном лесу зависит от географического положения, возраста и типа леса. Фитомасса березняка травяного 40-летнего возраста составляет 250 т/га, бучины 120-летнего возраста – 370, дубравы 220-летнего возраста 504 т/га. Основная часть возвращаемых элементов приходится на зеленую

массу опада – до 87 %. Величина подстилки зависит от гидротермических условий. Интенсивность БИКа в лиственных лесах 3–4, т. е. ниже, чем во влажных тропических лесах. Геохимический ряд возврата элементов: Ca > N > Si > K > Al, Mg, P, Fe > S, Mn > Na, Cl. В целом БИК среднепродуктивный, среднезольный, заторможенный, азотно-кальциевый. Поскольку в составе золы содержание кальция и магния высокое, то при минерализации органики эти элементы в значительной степени нейтрализуют кислые соединения, поэтому реакция почв слабокислая.

Ландшафты хвойных лесов бореального пояса характеризуются меньшим видовым разнообразием. В органике хвойных пород преобладает клетчатка (50 %), много лигнина смол, дубильных веществ, которые противостоят разрушению древесины микроорганизмами и вредителями. Показатели БИКа колеблются вслед за изменением гидротермических условий, типа и возраста леса, состава пород. Биомасса, например, 130-летнего сосняка бруснично-беломошного в северной тайге составляет 95 т/га, сосняка брусничного 70-летнего возраста средней тайги – 280 т/га, 70-летнего ельника зеленомошного средней тайги – 290 т/га. Зольные элементы и азот опада сосны образуют геохимический ряд: N > Ca > K > Mg, Si, P, S, Al > Fe, Mn, Na. Тип химизма хвойных лесов кальциево-азотный. Зольность хвои (2–3,5 %) выше, чем древесины (0,5–1,5 %). Масса подстилки высокая и зависит от типа леса. В еловом лесу Беловежской пущи подстилка составляет 34–52 т/га. Интенсивность БИКа круговорота в тайге сильно заторможенная (6–20), емкость средне- и малопродуктивная, зольность низкая.

В пределах типов лесных ландшафтов выделяются семейства по продукции фитомассы: в тропиках - постоянно-влажных, листопадно-вечнозеленых, сезонно-влажных лесов; в зоне широколиственных лесов с запада на восток: карпатско-кавказское, восточно-европейское, среднеазиатское, дальневосточное; в зоне хвойных лесов - три семейства: северной, средней и южной тайги.

Семейства ландшафтов делятся на классы: кислый (H-класс), кислый глеевый (H–Fe-класс), кальциевый (Ca-класс), сернокислый (H–SO_4-класс), соленосно-сульфидный. Наиболее распространенными являются кислый класс в пределах элювиальных ландшафтов и кислый глеевый – в пределах супераквальных.

Ландшафты кислого класса (H-класс) формируются в элювиальных условиях с глубоким уровнем залегания грунтовых вод. Коренные породы в разной степени выщелочены. Геохимическая обстановка окислительная. Заметно выражена водная и коллоидная миграция химических элементов. Ландшафты являются типичными для зональных условий. На кварцевых песках формируются ландшафты кислого класса, особо бедные водными мигрантами. Например, паданги тропиков, полесские ландшафты умеренного пояса. В них чувствуется острый дефицит элементов питания.

Ландшафты кислого глеевого класса (H–Fe) характеризуются супераквальными условиями с неглубоким УГВ. Господствует восстановительно-глеевая обстановка, элементы с переменной валентностью восстанавливаются и некоторые из них мигрируют (Fe, Mn). Накапливаются газы: CO_2, CH_4 и др. Сюда

переносятся мигранты из элювиальных ландшафтов. Формируются оглеенные, местами торфяные почвы. Ландшафта кальциевого класса (Ca-класс) развиваются на карбонатных породах, вулканических туфах в пределах элювиальных ландшафтов. Реакция почв близкая к нейтральной и изменяется в пределах pH 5,0–8,0. Среди глинистых минералов преобладает монтмориллонит. Гранулометрический состав пород глинистый и суглинистый. В тропических широтах формируются черные почвы. В биологическом круговороте ведущими элементами являются кальций и магний.

Кальциевый глеевый класс (Ca–Fe) формируется в межгорных депрессиях с избытком грунтовых вод на глинистых породах. К примеру, глеевые бурые лесные почвы суббореального пояса насыщены подвижными формами редких металлов, которые передвигаются по профилю. В иллювиальном горизонте почв концентрируется Ni, V, Mn, Cr. В растениях наблюдается повышенное содержание микроэлементов (Ti, Cr, Ba, Sr).

Магниевый класс (Mg-класс), выделен на Урале. Этот класс приурочен к ультраосновным породам, в которых магний преобладает над кальцием. В почвах повышено содержание Cr, Ni, Co.

Ландшафты сернокислого класса ($H–SO_4$) формируются при наличии в почвах и породах халькофильных металлов (Fe, Pb, Zn, Cu, Ag, As, Sb, Hg и др.) на глинах и сланцах (в тропиках, в горных районах тайги). Отмечается биогенная аккумуляция металлов в гумусовом горизонте почв. Грунтовые и поверхностные воды содержат в 30–40 раз больше металлов по сравнению с фоном. В водах высокое содержание иона SO_4^{2-}.В ходе эволюции сернокислый класс постепенно трансформируется в зональный кислый класс по мере окисления породы и выноса сульфат-иона за пределы ландшафта.

Ландшафты соленосно-сульфидного класса ($Na–H_2S$-класс) приурочены к приливно-отливной полосе, для которой характерна мангровая растительность. Питательные вещества постоянно поступают с морской водой с приливными водами океана. В илах приокеанических понижений происходит накопление сероводорода и формирование восстановительной сероводородной обстановки. Реакция среды нейтральная или слабощелочная. Мангровые ландшафты обеспечены элементами питания. Возможен избыток в них натрия, хлора, серы.

1.7. Степные ландшафты

Степные от лесных ландшафтов резко отличаются по многим показателям БИКа и геохимическим особенностям. Биомасса в степях в 10 раз меньше, в структуре фитомассы трав 70–90 % приходится на корневую систему. Ежегодный прирост практически близок к фитомассе (отношение lg П : lg Б = 0,77–0,97), опад составляет 40–50 % биомассы, зольность в 2 раза выше, чем в лесных ландшафтах. В разложении органического вещества в степных ландшафтах участвует больше бактерий и актиномицетов, меньше грибной микрофлоры, поэтому при минерализации органики образуется меньше кислых агрессивных соединений. Кальция и магния с опадом поступает достаточно, чтобы нейтрализовать избыточные кислоты и поддерживать реакцию среды, близкую к

нейтральной. Миграция органического вещества и коллоидов замедляется коагулирующим действием кальция.

Водная миграция элементов значительно меньше зависит от БИКа. Уменьшается интенсивность водной миграции катионогенных элементов, а в миграцию вовлекаются анионогенные элементы: геохимические процессы оргаио-, хелато- и оксидогенеза (свойственные лесным ландшафтам) сменяются кальцито-, гало- и сульфидогенезом. Существенно изменяется глеегенез: из кислого и нейтрального он становится преимущественно щелочным. Из-за уменьшения подвижности органики и закрепления многих элементов в малоподвижных органоминеральных комплексах на первое место среди комплексообразователей выходят карбонаты. Особенно хорошо образуют растворимые анионо-карбонатные комплексы анионогенные элементы B, V, Mo, As, S, Cr. Начинают мигрировать Ti, Zr, Se, тяжелые редкоземельные элементы иттриевой группы. Эти элементы подвижны в щелочной среде и малоподвижны в нейтральной и слабокислой.

По макроэлементному составу золы степные травы делятся на три группы: 1) злаки с высоким содержанием Si и невысоким N; 2) бобовые со значительным накоплением K, Ca и N; 3) разнотравье, занимающее промежуточное положение. Микроэлементный состав растений зоны степей определяется в основном видовыми особенностями накопления. Основной фон ландшафтов создают ариданитные растения (сложноцветные, маревые, частично злаки) с достаточно хорошо выраженной бор-молибденовой (анионофильной) специализацией, к которой иногда добавляются и некоторые катионогенные элементы (серебро, медь), образующие в щелочной среде растворимые карбонатные комплексы, доступные растениям. На этом фоне локально встречаются катнонофильные растения со стронциево-марганцево-цинковой специализацией, приуроченные преимущественно к переувлажненным лесоболотным местообитаниям (береза, ива, степные кустарники).

Геохимические барьеры: радиальные, характерные для степных почв: 1) биогеохимичсский в верхней части гумусового горизонта, где за счет биогенной аккумуляции накапливаются P, S, K, Ca, местами Mg, Na, Sr, Mn, Cu, Zn, Mo, Co, As, Ag, Ba, Pb и другие; 2) щелочной и термодинамический в нижней части гумусового горизонта и верхней части иллювиального, где накапливается $CaCO_3$ с сопутствующими микроэлементами (Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd).

В верхней части горизонта А в связи с энергичным разложением органических остатков почвенный воздух содержит много CO_2, и в растворе система Ca^{+2}: HCO_3^- является устойчивой. В нижней части гумусового горизонта CO_2 меньше и на термодинамическом барьере из раствора осаждается $CaCO_3$, образуя иллювиальный карбонатный горизонт. Определенную роль в осаждении $CaC0_3$ играют и другие причины: испарение растворов, деятельность микроорганизмов, которые получают энергию за счет данной реакции. Ca занимает господствующее положение в ППК, Роль Mg, K и Na – меньше. В почвах элювиальных ландшафтов господствует окислительная обстановка, на что указывает неподвижность Fe, отсутствие оглеения. В степях и пустынях, сформировавшихся на скальных породах, под гумусовым горизонтом располагается обло-

мочный горизонт с корками кальцита на поверхности обломков. На обрывистых плато карбонатный горизонт прослеживается в виде белых прослоев. Их нижняя часть находится ниже почвенного профиля и относится к коре выветривания. Такую кору Полынов назвал обломочной известковой. Особенно характерна она для степных базальтовых плато. В Армении мощность такой коры достигает 1,5 м. Образование известковой коры обусловлено 1) атмосферным поступлением $CaCO_3$ с атмосферными осадками и пылью, 2) перераспределением Са с участием БИКа, 3) поступлением из грунтовых вод в луговой супераквальной стадии развития ландшафтов террас и плоских равнин. В плейстоцене карбонатные коры формировались на всех материках. Лессы н лессовидные породы, широко представленные в зоне степей, многие авторы относят к конечным продуктам криогенного выветривания, считают, что эоловый лессовидный материал (мелкий и карбонатный) первоначально закреплялся на сырой поверхности снежников и преобразовывался почвенными процессами пустынного типа. В геохимическом отношении лессы аналогичны известковой коре выветривания, которая относится к кальциевому классу водной миграции.

В группе степных ландшафтов выделяются типы: саванны, субтропические сухие степи, луговые и сухие степи суббореального пояса.

Саванны (тип) распространены в субэкваториальном и тропическом поясах. Высокие температуры в течение года содействуют непрерывному протеканию геохимических процессов. В течение года сухой период с выпотным водным режимом почв сменяется влажным с промывным режимом. Кора выветривания по геохимическим особенностям близкая к коре выветривания влажных тропических лесов. В связи с меньшей длительностью промывного сезона она слабее выщелочена, содержит больше карбонатов и легкорастворимых солей (хлоридов и сульфатов). Это создает условия для формирования слабощелочной или щелочной реакции среды. Глинистые минералы, оксиды и гидроксиды, содержащие железо, менее гидратированы, поэтому окраска коры выветривания изменяется от красной до красно-бурой. По химическому составу кора выветривания ферраллитная, местами слабозасоленная или карбонатная. В почвах в сухой сезон появляются признаки легкого засоления, во влажный - соли выносятся из верхней части профиля. Инфильтрация влаги затруднена из-за преобладания суглинков и глин. Местами формируется латеритный панцирь на разной глубине, который служит механическим барьером для химических элементов. Минерализация вод во влажных саваннах ниже, чем в сухих, химический состав во влажных саваннах гидрокарбонатно-кремниевый, в сухих – гидрокарбонатно-кальциевый с повышенным содержанием магния, натрия, хлора, сульфатов. Тип химизма растительности азотно-кремниевый. Во влажных высокотравных саваннах количество фитомассы 30–80 т/га, в структуре преобладает многолетняя надземная часть (82 %). Средняя зольность растений 6 %. Среди зольных элементов ведущее место занимает Si, Ca. Интенсивность БИКа 0,1–0,3. В сухих саваннах по сравнению с влажными фитомасса меньше (27 т/га). Многолетняя надземная часть и корни по массе примерно одинаковы. Зольность фитомассы выше.

Среди господствующих классов водной миграции в элювиальных ландшафтах выделяются: кислый в высокотравной саванне, кальциевый – в типичной, карбонатный натриевый - в опустыненной. В супераквальных ландшафтах - соответственно кислый глеевый, карбонатный глеевый, карбонатный натриевый глеевый. В опустыненной саванне к солончакам приурочен соленосный класс, в котором состав типоморфные элементы - хлориды или сульфаты.

Сухие степи субтропического пояса встречаются в Северной и Южной Америке, в предгорьях Азии. Гидротермические условия способствуют минерализации органического вещества, гумификация выражена слабо. Геохимические процессы активизируются в период выпадения осадков. Весной теплая дождливая погода способствует росту разнообразных эфемероидов, а летом степь до следующей весны приобретает пустынный облик, в почвах складывается интенсивный выпотной режим. Кора выветривания состоит преимущественно из лессовидных суглинков и лессов. Из глинистых минералов преобладают гидрослюды, глубже по профилю – монтмориллонит. Породы содержат много калия (2–4 %), кальция, магния. Образуются горизонты аккумуляции карбонатов и гипса. В гумусовом горизонте аккумулируются элементы. Реакция почв нейтральная или слабощелочная. Наблюдается слабая миграция легкорастворимых солей, поскольку осадки проникают в почву до глубины 1–2 м. В коллоидах интенсивно аккумулируются оксиды Mg, Mn, Fe, P, Al, K, Ti. В супераквальных ландшафтах при УГВ 2,5–5 м распространены лугово-сероземные почвы с восстановительной глеевой обстановкой, где жесткие грунтовые воды способствуют отложению мергеля. Воды имеют повышенную минерализацию (300–800 мг/дм^3), по составу гидрокарбонатно-сульфатно-кальциево-натриевые. Фитомасса растительных сообществ около 15 т/га. Прирост и опад близки, в структуре фитомассы преобладает корневая система, зольность опада 6 %. Типичными классами ландшафтов субтропических степей является карбонатный, карбонатный глеевый класс.

Ландшафты луговых и сухих степей суббореального пояса в Евразии разделяют гумидные кислые ландшафты и аридные щелочные. В Северной и Южной Америке сухие степи занимают небольшие территории. В луговых степях умеренное сочетание тепла и влаги ведет к слабой миграции элементов по профилю почв и их высокой биогенной аккумуляции, накоплению гумуса. В сухих степях в связи с повышением температуры и понижением количества осадков (200–350 мм в год) условия малоблагоприятны для миграции элементов, способствуют аккумуляции солей, что приводит к слабому засолению почв и коры выветривания. Формируется непромывной, местами выпотной водный режим почв.

Кора выветривания сиаллитно-карбонатная, представлена лессовидными суглинками и глинами, местами лессом. В сухих степях - больше карбонатов и легкоподвижных мигрантов. Реакция слабощелочная. В зависимости от генезиса пород может изменяться соотношение между глинистыми минералами: в осадочных породах преобладает гидрослюдисто-монтмориллонитовая группа, на элювии гранита – каолинитово-гидрослюдистая. Реакция почв нейтральная, поэтому в растворимой форме мало содержится P, Mn, Zn, Cu, B, Fe, Co. В поч-

вах сухих степей лаги в почве достаточно лишь для выноса легкорастворимых солей за пределы корнеобитаемого слоя. Менее растворимые карбонаты и сульфаты кальция и магния перемещаются по профилю незначительно. В гумусовом горизонте аккумулируются Na, K, Ca, Mn, Co. Непромывной водный режим способствует равномерному распределению по профилю монтмориллонитов. Реакция почв нейтральная или слабощелочная. Опад быстро минерализуется, поэтому гумуса меньше (1–4 %), чем в почвах луговых степей. Гуминовые кислоты преобладают над фульвокислотами.

Воды луговых степей гидрокарбонатно-кальциево-магниевые пресные со средней минерализацией (0,45 г/л). Они содержат небольшое количество коллоидов и органического вещества, поэтому прозрачны. В сухих степях воды высоко минерализованы (0,9–4,0 г/л. Химический состав сульфатно-кальциево-магниевый и сульфатно-хлоридно-натриево-кальциевый. Органическое вещество мигрирует слабо, образуя с кальцием комплексные соединения, выпадающие в осадок. Среди донных озерных отложений встречаются сапропели, сода и гипс. Растительность в луговых степях разнотравно-злаковая, с высоким видовым разнообразием. Фитомасса 20–30 т/га, в структуре преобладают корни. Зольность 3–4%, скорость разложения органических остатков отстает от поступления, поэтому образуется плотная дернина (степной войлок). Ведущими элементами являются N, Si, Ca, K, тип химизма растений азотно-кремниевый, В сухих степях - преимущественно полынно-злаковые, типчаково-ковыльные сообщества. Объем фитомассы 10–20 т/га, основная часть зольных элементов сосредоточена в корневой системе. Злаки содержат много N, Si, Ca, содержание хлора увеличивается до 4, натрия до 1 %. Зольность опада 3–6 %.

В семействах лугово-степных ландшафтов на водоразделах преобладает карбонатный класс водной миграции. В ландшафтах сухих степей преобладающим классом водной миграции является карбонатно-натриевый класс, в супераквальных условиях – карбонатный глеевый и карбонатно-натриево-глеевый классы. Карбонатный глеевый класс водной миграции представлен в долинах рек с близким УГВ. Железо и марганец мигрируют слабо, осаждаются с образованием конкреций. В их состав входят редкие и рассеянные элементы: As, Cu, V, Cr, Mo, Co, Ni, Mn. Содовый класс водной миграции встречается в местах выхода на поверхность сульфатно-натриевых вод и взаимодействия их с карбонатом кальция. В содовых водах активно мигрируют анионогенные элементы (Si, Al, Mo, Ag, Se, U, Y, Sc, Cu, Be, Zr и др.), гумусовые вещества. Высокое содержание обменного натрия и сильнощелочная реакция отрицательно влияют на развитие растений. Сернокислый класс водной миграции хорошо изучен в пределах Южного Урала. Воды, связанные с зоной окисления сульфидного рудного тела, сульфатные с содержанием халькофильных элементов Fe, Zn, Cu.

1.8. Геохимия ландшафтов пустынь, тундры, верховых болот

В группе ландшафтов пустынь выделяются типы: пустыни субтропиков и тропиков, суббореальные пустыни, холодные и высокогорные пустыни.

Кора выветривания в пустынях маломощная Si-Al-Na, формируется преимущественно за счет механического растрескивания пород. Замедляется трансформация минералов во вторичные. Среди глинистых минералов преобладают гидрослюды, реже монтмориллонит и каолинит. Коры выветривания делятся на древние (известковые, железистые, кремниевые) и современные – преимущественно карбонатные, хлоридно-натриевые и сульфатно-натриевые.

В пустынных ландшафтах водная миграция элементов значительно меньше зависит от БИКа. Растительность не играет большой роли в накоплении элементов в ландшафте, так как содержит их в тысячу раз меньше, чем почвы и грунтовые воды. Ведущая роль в миграционных процессах принадлежит соединениям хлоридов, сульфатов и карбонатов. Важное значение приобретают процессы засоления и рассоления. Засоление усиливается с засушливостью климата, но очень важны и геологические условия. Универсальным поставщиком солей служат выветривание и почвообразование, переводящее Na, Cl, S и другие подвижные элементы из пород в водный раствор. Иногда пустыни побережий подпитываются морскими водами (Каспий). Организмы по-разному приспособились к засолению. Наряду с солянками, содержащими много солей, есть виды, выделяющие их избыток на поверхности листьев (тамариск). Ксерофиты не накапливают соли. В галофитах резко преобладают Cl, S и Na, повышено содержание B, Mo, Sr, иногда Li, Cu, Zn.

Засоление распространено на аллювиальных равнинах, где пресные речные воды, фильтруясь в аллювиальные отложения, дают начало горизонту грунтовых вод. По мере испарения вод, соли выпадают в осадок. Из менее соленых вод выпадают труднорастворимые соли ($CaCO_3$, гипс $CuSO_4 \cdot 10H_2O$), из более соленых - легкорастворимые. Аналогичная закономерность наблюдается в вертикальном профиле: ближе к грунтовым водам осаждаются менее растворимые соли, выше - более растворимые. В сухой и жаркий летний период в Центральной Азии из грунтовых вод осаждаются хлориды и сульфаты натрия. В дождливый зимний период вымываются только хлориды, а растворимость сульфатов снижается, при низкой температуре из раствора выпадает мирабилит $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ (глауберова соль). В результате в почвах сульфаты преобладают над хлоридами.

Рассоление ландшафта означает не только удаление солей из почв и грунтов, но и уменьшение минерализации вод, смену флоры (исчезновение галофитов), фауны. Существует два геохимических типа рассоления: кальциевое и натриевое, которые протекают по-разному. Кальциевое рассоление характерно для солончаков, содержащих много солей Ca, который вытесняет Na из ППК. Почвы рассоленных кальциевых ландшафтов содержат реликтовый гипсовый горизонт. В пустынях он обычно залегает близко от поверхности, такой ландшафт называют гипсовой пустыней. Натриевое рассоление - образование солонцов. Если в солончаках преобладают соли натрия, гипса мало, то при рассолении образуются почвы с преобладанием Na в ППК. Коллоиды, насыщенные Na, легко переходят в раствор, это вызывает выщелачивание илистых частиц и оксидов Al, Fe из верхнего горизонта почвы вниз по профилю. В результате вверху формируется гумусово-элювиальный осветленный горизонт A_1A_2 с

фульватным гумусом. Ниже - иллювиальный солонцовый горизонт B_{Na} - плотный, столбчатый, с максимумом содержания физической глины, сильнощелочной реакцией среды, т.е. сорбционный геохимический барьер, на котором осаждаются микроэлементы. Но подвижные анионогенные элементы на этом барьере накапливаются слабо (кроме Mo), более типично накопление катионогенных элементов Cu, Ni, Pb, Ag. В почвенном растворе иллювиального горизонта солонцов содержится сода Na_2CO_3, что определяет высокий pH (до 10–11). В содовых водах мигрируют многие элементы Si, AI, Mo, Ag, Se, U, Cu, Zr. Легко растворяется и гумус. SiO_2 в щелочной среде присутствует в виде подвижных коллоидов, что обеспечивает миграцию $NaHSiO_3$ в солонцовых почвах. Миграция Fe и AI в виде комплексных анионов, пептизация и перенос глинистых минералов тоже способствуют миграции микроэлементов.

Высокое содержание обменного натрия и сильно щелочная реакция неблагоприятны для жизни и БИК на солонцах ослаблен. Поэтому в полупустынях для солонцов характерна чернополынная растительная ассоциация. Находясь в условиях щелочной среды, высокого содержания обменного Na, Mg, растворимого Si, флора подвергается отбору на химической основе. Установлена селективная концентрация анионогенных элементов и комплексообразователсй (Mo, Cu, Zr, Ga, Al, Ti, Cr, V и др.) многими растениями семейств маревых и сложноцветных (полыни). Катионогенные элементы (Sr, Ba) малоподвижны в щелочной среде солонцовых почв и слабо поглощаются растениями.

В почвах пустынь элементы равномерно распределены по профилю, что говорит об их слабой миграции. По сравнению с почвообразующей породой в почве накапливаются Si, Fe, Al, P, Mn, Ti, K, Na. Воды в пустынях сильно засолены, имеют минерализацию до 10 г/дм^3. По химическому составу типичны воды хлоридно- сульфатные, однако могут быть гидрокарбонатно-кальциевые и смешанного состава. Для растений пустынь характерны высокая интенсивность БИКа - 0,1, повышенная зольность (7–9 %), кальциево-кремниевый тип химизма.

Выделение семейств в тропических пустынях проводят по ареалам распространения растительных сообществ. Классы водной миграции выделяют по типоморфным элементам: Ca, Na, Cl, SO_4, OH. Наиболее часто встречаются следующие классы: карбонатный натриевый (Ca, Na), гипсовый (Ca, SO_4). Реже встречаются карбонатный натриевый глеевый (Ca, Na, Fe), гипсовый глеевый (Ca, SO_4, Fe). Господствующим классом водной миграции пустынь и полупустынь суббореального пояса является карбонатно-натриевый класс.

В холодных и высокогорных пустынях химический состав мелкозема зависит от состава пород. Элювий кристаллических сланцев по сравнению с карбонатной породой содержит больше оксидов Al, Fe, K, Na. Зола торфа концентрирует оксиды Al, Fe, P, S. Геохимическая обстановка слабо окислительная. Миграция элементов задерживается на механическом и биогенном барьере. Воды в почве представлены твердой фазой, а водотоки временные, поэтому водная миграция элементов выражена слабо. Продуктивность растительных сообществ холодных пустынь самая низкая и может быть сравнима с водорослево-лишайниковыми сообществами жарких пустынь. Фитомасса не превышает

0,1 т/га. Зольность лишайников и водорослей низкая (1–4 %), в золе преобладают N, Mg, Ca, Si, K. У некоторых видов отмечено накопление Al и Fe. Высокогорные пустыни характеризуются сухим климатом и сильным испарением в связи с высокой инсоляцией. Химический состав и структура фитомассы примерно такие же, как в сообществах равнинных пустынь.

В группе тундровых ландшафтов выделяются зональный тип – тундровый и азональный - верховых болот.

Тундровые ландшафты характерны для условий субарктического пояса. Они проявляют сходство по геохимическим показателям с северной тайгой, а также со степями и пустынями. Как в условиях аридного климата гидротермические показатели неблагоприятны для роста и развития растений, правда в тундре лимитирующим показателем является низкая температура, а в аридных – малое количество осадков. Поэтому ландшафты близки по величине опада, низкому приросту, характерным водным мигрантам. Разложение органических веществ, напротив, аналогично северной тайге. Об этом говорит большое накопление подстила, важное участие в БИКе Al, Fe, Mn. Низкие температуры тормозят геохимические процессы. В тундровых ландшафтах почвенный профиль практически совмещен с корой выветривания. Тип коры выветривания - грубообломочная сиаллитная. Глинистые минералы представлены небольшим количеством гидрослюд, монтмориллонита, иллита, хлорита. Подвижные элементы мигрируют в пределах профиля почвы и аккумулируются биогенным путем.

Почвенно-грунтовые и речные воды относятся к ультрапресным, по сравнению с таежными ландшафтами содержат меньше ионов водорода – реакция слабокислая. Химический состав воды гидрокарбонатный, местами гидрокарбонатно-кальциевый, гидрокарбонатно-кальциево-магниевый. В воде повышено содержание Si и Fe. Цветность воды высокая, что говорит об активной миграции органических соединений. В профиле почв совмещаются две обстановки: окислительная и восстановительная глеевая. Агрессивные фульвокислоты передвигаются с подвижными элементами вглубь по профилю, а органо-минеральных соединений с кальцием и полуторными оксидами очень мало. Подвижных элементов питания в подвижной форме не хватает для растений.

Фитомасса небольшая, в среднем от 5 в арктической до 28 т/га в кустарничковой тундре,в структуре фитомассы преобладает корневая система. Из-за медленного разложения остатков накапливается подстил, поэтому интенсивность БИКа замедленная (20–50). Из-за низкой зольности фитомассы характерен азотный тип химизма растений. В составе тундровых ландшафтов выделяется четыре семейства: арктической; мохово-лишайниковой; кустарничковой и горной тундры. Господствующими классами ландшафтов является кислый глеевый (H, Fe) и кислый (H) классы. Редко встречаются карбонатный (Ca); сернокислый ($H\text{-}SO_4$) в горной тундре, соленосный сульфидный (Na, Cl, SO_4) на побережье.

Азональные ландшафты верховых болот независимо от географического положения относятся к группе тундровых ландшафтов, распространены в субарктическом, бореальном и суббореальном поясе, занимая среди тундровых и

лесных ландшафтов большие площади. Верховые болота не связаны с минеральным грунтом и, как правило, находятся вне зоны влияния грунтовых вод. Они располагаются, преимущественно на водоразделах, но встречаются и на террасах, в котловинах. Источником минерального питания верховых болот служат только атмосферные пыль и осадки, что приводит к минеральному голоданию растений. Торф состоит преимущественно из сфагнового мха, гумусовые вещества представлены агрессивными фульвокислотами, реакция среды сильнокислая. Сфагновый мох растет очень медленно, его выделения имеют сильнокислую реакцию (pH 3–4), которая позволяет разлагать пылинки и извлекать растворенные минеральные соединения. В толще торфа выражены окислительная и восстановительная геохимические обстановки. Такие условия подавляют деятельность микроорганизмов, отмершая органика не минерализуется, содержание золы в торфе низкое (2–6 %). По сравнению с торфом низинных болот здесь содержится меньше оксидов Si, Ca, Mg, Al, Fe, S, P, Na и микроэлементов. Исключением является цинк и свинец, содержание которых в 1,5-2 раза больше в торфе верховых болот. Даже если подстилающая порода богата элементами, растения не могут их получить, т.к. верховой торф растет за счет поступления элементов из атмосферы. Воды ультрапресные, гидрокарбонатные. Реки и озера имеют прозрачную коричневую кислую воду, бедны жизнью. Озерный ил состоит из торфа, сапропеля нет. На верховых болотах организмы находятся в условиях резкого дефицита водных мигрантов и N. БИК застойного типа - интенсивность более 50. Семейство ландшафтов верховых болот выделяются по природным зонам. Единственный класс ландшафтов - кислый, потому что несмотря на восстановительную обстановку, Fe в водах очень мало, так как его источники - атмосферная пыль и осадки. Избыточным элементом является водород, к дефицитным относятся все остальные.

1.9. Геохимия Мирового океана

Мировой океан – ключевое звено в ландшафтной оболочке Земли. Его значение определяется основными факторами: ролью в энергетическом балансе (воды Мирового океана – аккумулятор тепловой энергии; избыток солнечной радиации расходуется на испарение океанических вод); ролью в круговороте воды (океан как накопитель вод и начальное звено в круговороте); ролью океана как двустороннего фильтра (с одной стороны – осаждающего основной объём веществ, поступающих с суши; с другой – растворяющего и осаждающего излишки вулканических и атмосферных газов).

В формировании химического состава вод принимают участие соединения, привнесенные и образованные в океане. Миграция элементов весьма активна, так как воды находятся в постоянном движении и обновлении при относительной стабильности состава. В океанических водах помимо кислорода и водорода содержатся в растворенном состоянии многие элементы. Общее содержание растворенных соединений в морской воде - соленость выражается в промилле. В открытом океане средняя соленость составляет около $35^{o}/_{oo}$. Основной солевой состав океанических вод образуют те же ионы, что и вод суши, но в другом

соотношении (%): катионы Na^+ 30,6, Mg^{2+} 3,7, Ca^{2+} 1,2, K^+ 1,1; анионы Cl^- 55, SO_4^{2-} 7,7, HCO_3^- 0,4. В заметном количестве присутствуют Br 0,2 %, B 0,07, Sr 0,03, F 0,003 %. На эти ионы приходится 99,99 % от растворенных в Мировом океане. В то же время, Al и Fe, одни из главных элементов в земной коре, в океане имеют концентрацию более низкую, чем Mo и Zn. Очень мало в морской воде растворено соединений Si, несмотря на то, что ежегодно реки выносят в море около 400 млн. т силикатов. Это можно объяснить тем, что силикаты реагируют с бикарбонатами, образуя глину, осаждающуюся на дно, а также тем, что большую часть силикатов потребляют в верхнем слое океана диатомовые водоросли. Среди редких и рассеянных химических элементов в водах Мирового океана отмечено повышенное содержание Li, Rb, I, Ba. Растворенные газы (O_2, CO_2, N_2, Ar) образуют с водой газовые гидраты. От полярных районов к тропикам растворимость O_2 понижается с 8,5 до 4,5 мг/л). Содержание растворенного CO_2 в водах океана составляет в среднем 1,5 мг/л. Важное значение в химическом составе вод океана занимает органическое вещество в растворенной, коллоидной форме и взвеси.

Одна из наиболее важных и сложных равновесных систем в океане – карбонатная система, объединяющая углекислый газ, угольную кислоту и продукты ее диссоциации (H^+, HCO_3^-, CO_3^{2-}). Сумма ионов HCO_3^- и CO_3^{2-} определяет карбонатную щелочность вод океана (96 % щелочности), а 4 % приходится на боратную щелочность. Концентрация ионов водорода функционально связана с концентрацией CO_2 и продуктов диссоциации воды. Карбонатное равновесие определяется парциальным давлением растворенного CO_2, которое при условии равновесия с атмосферой равно парциальному давлению CO_2 в атмосфере. Повышение парциального давления CO_2 ведет к снижению pH и повышению содержания O_2. Разложение органического вещества увеличивает парциальное давление растворенного CO_2, а фотосинтез, наоборот, понижает его.

Для жизни океана имеет важное значение и равновесие окислительно-восстановительных (ОВ) условий. По мере уменьшения концентрации растворенного кислорода (< 0,5–1,4 мл O_2/л) и падения ОВ потенциала донором электронов вместо молекулярного кислорода становятся нитрат-ионы. Они восстанавливаются анаэробными бактериями последовательно до нитрит-ионов – гидроксиламина – закиси азота – молекулярного и аммонийного азота. При понижении концентрации нитрат-ионов в воде донором электронов становятся сульфат-ионы, которые восстанавливаются анаэробными бактериями до H_2S, HS^-, S^{2-}, сумму которых условно называют «сероводородом», хотя в воде океана в анаэробных условиях преобладают гидросульфид-ионы. С падением концентрации сульфат-ионов в водах накапливается метан. Анаэробные зоны известны для придонных вод впадин морей Черного, Аравийского, Красного, Балтийского и заливов Мексиканского и Оманского.

За счет деятельности азотфиксирующих бактерий в океан из атмосферы попадает за год около 140 млн. тонн азота. Примерно такое же количество азота возвращается в атмосферу в результате осуществляемого другими бактериями процесса денитрификации. Выявлено, что основными областями процессов азотфиксации и денитрификации являются Тихий океан и Аравийское море.

Основную массу органического вещества в океане образуют главные азотфиксаторы - фитопланктон и цианобактерии. За счет дальнейшего использования этой органики существует в океане вся остальная жизнь. Однако распределение фитопланктона по акватории Мирового океана крайне неравномерно. Высокая продукция фитопланктона наблюдается только в северной части Атлантического и Тихого океана, а также у берегов континентов и в районах подъема глубинных вод (upwelling). Основная причина низкой продуктивности тропических вод - недостаточное количество элементов, необходимых всем организмам – азота и фосфора. Углерод, азот и фосфор в среднем соотносятся в веществе планктона как 106 : 16 : 1 (соотношение Редфильда). Выявлено, что в течение сотен тысяч лет продукция фитопланктона ограничена количеством фосфора, который поступает в океан только с суши, а цианобактерии «подстраивают» связывание азота под имеющийся фосфор.

Процесс денитрификации в океане возвращает азот в атмосферу. Азот, усвоенный азотфиксаторами, переводится в аммонийную форму, его окисляют до нитратов нитрифицирующие бактерии, а бактерии-денитрификаторы восстанавливают нитраты до молекулярного азота. Денитрификация протекает в анаэробных условиях, поскольку только в отсутствие кислорода в качестве окислителя органического вещества может использоваться NO_3^-. В океане денитрификация происходит во фьордах (где долго не перемешивается глубинная толща вода), в верхнем слое донных отложений и в некоторых местах в водной толще океана (на глубине 200–700 м), где мало кислорода, но есть органическое вещество и нитраты. Такие условия складываются, в частности, в Аравийском море и в некоторых областях тропической зоны Тихого океана.

Закономерности количественного распределения в океане химических элементов в растворенной форме и взвешенном состоянии наблюдаются по трем типам зональности: циркумконтинентальной (уменьшение концентрации элементов по мере удаления от континентов), широтной климатической и вертикальной гидрологической. На распределение химических элементов по широтной и вертикальной зональности влияет много причин: гидрологические условия (вертикальное и горизонтальное течение вод), приток элементов с речными водами, стратификация вод океана, активность фотосинтеза, техногенез. Например, содержание кремнекислоты и фосфатов увеличивается с глубиной, поскольку у поверхности они используются живыми организмами как элементы питания. Равномерно распределены в морской воде Sr, Pb, U, Cs, Sb, Li, Mo. Химические элементы частично переносятся на сушу с атмосферными осадками. Основная часть их выпадает вблизи от океана и по мере продвижения вглубь континента осадки обедняются химическими элементами.

Для фауны и флоры океана характерен широкий диапазон количества органических и минеральных соединений и концентраций отдельных элементов. Некоторые виды животных океана являются концентраторами металлов: моллюски накапливают Cu, медузы – Pb, Zn, Sn, лангусты – Co, устрицы – Cu, Zn, Ag, мидии – Ba. Живые организмы участвуют в круговороте химических элементов, метаболизме их соединений, фотосинтезе, денитрификации, суль-

фатредукции, окислении, восстановлении, образовании донных осадков и их диагенезе.

В Мировом океане формируются донные отложения богатые редкими и рассеянными химическими элементами. В них значительную площадь занимают железисто-марганцевые конкреции. Содержание химических элементов в иловых водах в десятки и сотни раз выше, чем в водах океана. В них концентрируются элементы железо-марганцевой группы (Fe, Mn, Cr, Ge, V, Al, Ti, Zr, Ga, Ta, Nb, Pb, Zn, As, Cu, Mo, Co, Ni), образуя стяжения, которые участвуют в формировании рудных пород. Железомарганцевые конкреции, широко распространенны на дне Мирового океана и концентрируются в рудных полях. Их распределение неравномерно из-за различий геохимического поведения Mn и Fe:

- Fe осаждается как в окислительных, так и восстановительных условиях осадочной толщи, образует собственные минералы или входит в состав других;
- Mn может находиться в твердой гидроксидной форме только в окисленной среде в виде MnO_2, а в восстановленных осадках растворяется, восстанавливаясь до MnO, и мигрирует к поверхности - в сторону кислородсодержащей среды.

Mn имеет замкнутый круговорот в океане, и в ходе геологического времени многократно переходит из раствора в твердую фазу и наоборот, каждый раз теряя часть ранее связанного с ним Fe, что приводит к относительному обогащению конкреций марганцем.

Химический состав океанских конкреций крайне разнообразен: в тех или иных количествах присутствуют практически все элементы периодической системы, с ними связаны все представляющие экономический интерес металлы, в том числе редкоземельные (скандий, лантан, иттрий, празеодим, самарий, неодим и др.). В настоящее время глубоководные океанические илы рассматриваются как перспективный источник добычи редкоземельных металлов. Распределение илов соответствует распределению железомарганцевых конкреций, богатых также на кобальт, медь, никель и цинк. Важным экологическим преимуществом перед месторождениями этих металлов на суше является отсутствие в ассоциации радиоактивных урана и тория.

Экосистема Мирового океана с каждым годом подвергается все более высокому техногенному давлению, что отрицательно сказывается на биологической продуктивности живых организмов. Наиболее распространенные техногенные компоненты Мирового океана: радионуклиды (^{90}Sr, ^{173}Cs и др.), хлорорганические токсиканты (ДДТ, альдрин, линдан и др.), тяжелые металлы (ртуть, кадмий, свинец и др.), нефть и нефтепродукты.

1.10. Геохимия городских ландшафтов. Геохимия агроландшафтов

На территории городов все компоненты городской среды испытывают существенную геохимическую перестройку. Здесь сочетаются процесс воздействия техногенных источников - техногенез с процессом геохимического пре-

образования городских ландшафтов - урбогенез. Эколого-геохимический подход к изучению города предполагает оценку имиссии (накопления) загрязняющих веществ в депонирующих (сохраняющих) средах (снег, почвы, донные отложения, растения, ткани животных и человека). Это позволяет выявить источники загрязнения городской среды, определить масштабы геохимических аномалий; оценить экологические риски и разработать меры по улучшению городской среды. Геохимия городских ландшафтов сочетает системную методологию геохимии ландшафтов (географическую) с индикационно-оценочными подходами поисковой геохимии и геохимии окружающей среды.

Геохимическая классификация городских ландшафтов предложена Перельманом и Касимовым (1994) для двух масштабных уровней: систематика городов как целостных систем и классификация элементарных ландшафтов в пределах городской системы. Геохимическая систематика городов выполняется по техногенным и природным критериям миграционных процессов (таблица 1):

Таблица 1 – Геохимическая систематика городов

Единицы	**Критерии выделения**
Отряд	Техногенез, искусственный рельеф, концентрация населения
Разряд	Степень воздействия на население и городскую среду
Группа	Группа природных геохимических ландшафтов
Тип	Тип природного геохимического ландшафта
Семейство	Особенности воздушной миграции продуктов техногенеза
Класс	Класс водной миграции продуктов техногенеза
Род	Геохимическая специализация литогенного субстрата

Степень техногенного воздействия определяется по показателю эмиссионной нагрузки выбросов на одного жителя в год (Е) и показателям состояния депонирующих сред: суммарного показателя загрязнения почв и снега (Z_c) и пылевой нагрузки (Р). Оценочная шкала по этому признаку эмпирическая, разработана с учетом результатов эколого-геохимического обследования городов. Подразряды городов выделяют по структуре макро- (оксиды и диоксиды азота, серы, углерода, пыль - более 90–95 % от объема выбросов), и микрозагрязнителей (тяжелые металлы, хлорорганические соединения, углеводороды и др.). Далее систематика городов предусматривает их детальную природную характеристику. Группы и типы городов выделяются по природным ландшафтам, в пределах которых сформировались урбанизированные территории. Таксономический признак, учитываемый на этом уровне - зональные геохимические особенности ландшафтов городов. Семейства городов определяются геоморфологическим положением города в бассейне атмосферного переноса, с которым связаны соотношение сильных и штилевых ветров, наличие инверсий, определяющих появление смога, рельеф и т.д. Классы городов выделяются по условиям водной миграции продуктов техногенеза. Для города в целом указывают классы наиболее типичных почвенно-геохимических катен (например, сочетание кислого и кислого глеевого классов). Род определяется по аномальности содержания элементов в почве города.

Геохимическая классификация городских элементарных ландшафтов на верхних уровнях использует антропогенные критерии, на нижних - природно-обусловленные (таблица 2).

Таблица 2 – Геохимическая классификация городских элементарных ландшафтов

Единица	**Критерии выделения**
Порядок	Принадлежность к функциональной зоне, загрязнение
Отдел	Особенности воздушного привноса веществ, специализация отходов
Раздел	Уровни и опасность загрязнения
Группа	Особенности биологического круговорота веществ
Класс	Класс водной миграции продуктов техногенеза
Род	Проложение в ландшафтно-геохимических катенах
Вид	Химический состав литогенного субстрата

Формирование техногенных геохимических аномалий в компонентах ландшафта зависит от функциональной зоны, определяющей характер и уровень техногенного воздействия, и ландшафтно-геохимических условий, перераспределяющих это воздействие. Порядки городских ландшафтов определяются по функциональной зоне: 1) парково-рекреационный; 2) агротехногенный; 3) селитебный; 4) селитебно-транспортный; 5) промышленный. Поступление загрязняющих веществ из атмосферы по сравнению с фоном колеблется от менее 10 в парково-рекреационной зоне до более 30 в промышленной. Отделы городских ландшафтов выделяются по особенностям воздушного привноса - выноса веществ и геохимическому составу выбросов, отходов и стоков. Парково-рекреационный, агротехногенный, селитебный порядки городских ландшафтов – зоны преимущественно привноса (имиссии) загрязняющих веществ. Они испытывают меньшую атмотехногенную нагрузку. В парково-рекреационных ландшафтах велика роль БИКа. Агротехногенные ландшафты (сады, огороды), находятся под двойной нагрузкой техногенных веществ – выпадений из воздуха и поступления с удобрениями. Здания и сооружения селитебных ландшафтов служат механическим барьером на пути воздушных потоков веществ, контрастность выпадений пыли зависит от их высоты. Поэтому порядок селитебных ландшафтов делят на отделы: с низкоэтажной застройкой (слабая выраженность механических барьеров, преобладание латеральной воздушной миграции); со средне- и высокоэтажной застройкой (контрастные механические барьеры, преобладание восходящих воздушных потоков). Селитебно-транспортный и промышленный порядки городских ландшафтов - это источники эмиссии и места частичной аккумуляции техногенных веществ. Селитебно-транспортные ландшафты делятся на отделы по интенсивности движения и, соответственно, воздействия (улицы, автострады, и др.). Промышленные ландшафты делятся на отделы по типу производства, сырья, источника энергии и характера отходов.

Разделы городских ландшафтов выделены по уровню опасности для живых организмов исходя из загрязнения природных компонентов. Показатели – пылевая нагрузка и суммарные показатели загрязнения снега, почв и, возмож-

но, растений. 16 разделов городских ландшафтов охватывают основные комбинации функциональных зон и уровней опасности.

Классы выделяются по сочетанию окислительно-восстановительных, щелочно-кислотных условий и видов геохимических барьеров в профиле почв и в ряду сопряженных ландшафтов с сохранением традиционных названий (кислый, кислый глеевый, т.д.). Подкласс отражает тенденции изменения геохимических условий (кислый нейтрализующийся, щелочной, подкисляющийся и т.п.).

Род элементарных ландшафтов определяется по положению в катене (элювиальный, трансэлювиальный и т.д.). Рельеф города влияет и на воздушную миграцию, поэтому выделяется подрод городских ландшафтов (трансэлювиальные наветренные, трансэлювиальные подветренные и т.д.). На уровне подрода также можно обозначить принадлежность элементарных ландшафтов к природным (водно-эрозионным) или природно-техногенным (системы ливневого стока) катенам, а также открытость или замкнутость катен, потому что от этой характеристики зависят особенности аккумуляции продуктов техногенеза.

При выделении вида городских ландшафтов учитывается гранулометрический состав почв и грунтов, потому что от него сильно зависит способность ландшафта аккумулировать элементы (прежде всего за счет сорбции). Так, сорбционная емкость песков значительно меньше, чем у суглинков, пески лучше промываются атмосферными осадками и т.п.. При этом естественные почвы и грунты отличаются от техногенных почв, асфальтированных поверхностей.

Реализация рассмотренной классификационной схемы при крупномасштабном ландшафтно-геохимическом картографировании городов сталкивается с методическими трудностями из-за неполноты геохимической информации, изменчивости показателей.

Интенсивность загрязнения почв в городе определяют через суммарный показатель загрязнения: $Z_c = \sum K_c - (n-1)$, где K_c – коэффициент техногенной концентрации элементов, величина которых превышает значение 1,5; n – число элементов с $K_c > 1,5$. На основе Z_c разработана ориентировочная шкала оценки эколого-геохимического состояния почв (таблица 3).

Таблица 3 – Оценка уровня загрязнения почв по Z_c

Уровень загрязнения почв	**Величина Z_c**	**Изменения показателей здоровья населения в очагах загрязнения**
Отсутствует	менее 16	Низкий уровень заболеваемости детей и минимум функциональных отклонений
Допустимый	16–32	Низкий уровень заболеваемости детей и минимум функциональных отклонений
Умеренно опасный	32–64	Увеличение общего уровня заболеваемости
Опасный	64–128	Увеличение общего уровня заболеваемости, числа часто болеющих детей, детей с хроническими заболеваниями
Чрезвычайно опасный	более 128	Увеличение заболеваемости детей, нарушение репродуктивной функции женщин

Агроландшафты –отряд техногенных ландшафтов с ведущей ролью БИКа в миграции элементов. Негативными следствиями обработки почвы являются уплотнение и накопление техногенных элементов, поступающих в почву от транспортных средств, – Mn, Ni, Co, Cr, V, Pb. Применение удобрений нередко вызывает нежелательные изменения баланса элементов. Наибольшие нарушения баланса связаны с применением азотных и фосфорных удобрений. Сильное загрязнение азотом характерно для пойм и дельт крупных рек в районах интенсивного овощеводства, где содержания нитратов и нитритов превышают ПДК многократно. С фосфорными удобрениями в почвы вносятся избыточные количества микроэлементов (Cd, As, Sr, F, иногда U, Pb, Cd, Zn и др.). Элементы-примеси (As, Cd), в отличие от фосфора, слабо усваиваются растениями, поэтому накапливаются в почвах и грунтовых водах. Пестициды – синтетические соединения, созданные для борьбы с насекомыми (инсектициды), сорняками (гербициды), болезнетворными грибами (фунгициды) или бактериями (бактерициды). Все пестициды обладают канцерогенным воздействием на человека и экосистемы. Водная мелиорация ведет к изменению окислительно-восстановительных условий, ускорению водной миграции и дефициту микроэлементов, загрязнению водоемов-приемников дренажных вод.

Использование ландшафтно-геохимического метода при изучении агроландшафтов основывается на изучении баланса элементов в доступной для растений форме под каждой выращиваемой культурой и в системе севооборота. Ведутся агрохимические исследования почв (составление картограмм кислотности, по фосфору, калию, микроэлементам); стационарные исследования на базе опытных хозяйств, разрабатываются предложения по геохимической стабильности агроландшафта. Геохимическая оптимизация агроландшафтов имеет свою специфику в каждой природной зоне. Пример расчетов баланса приведен в учебнике.

Химический состав с/х растений повторяет состав природных с тем же генетическим кодом, например, в злаках высокое содержание Si, Fe в горохе – Mo, в красном клевере – N, K, Ca, Mg, во льне – P, Zn, Cu. Большинство элементов в агрофитоценозах распределяется по базипетальному типу. Злаки агрофитоценозов (рожь, пшеница, ячмень, овес), по сравнению со злаками естественных лугов, имеют выше зольность (до 9 %), больше аккумулируют Ca, Na, Fe, Cu и меньше N, P, K, S, Mn, Zn, B, Co, Mo.

Геохимическая классификация агроландшафтов Беларуси выполнена Н.К. Чертко на основе классификации геохимических ландшафтов Перельмана с учетом антропогенных (группа, тип) и природных факторов (остальные).

Выделяются группы агроландшафтов по степени с/х освоения: антропогенно-природная, природно-антропогенная, антропогенная. Антропогенно-природная группа представлена улучшенными лугами и пастбищами с частичным или полным сохранением природной растительности. В природно-антропогенную группу отнесены пашня, сад, огород. В группах выделяют подгруппы по бывшей природной растительности: например, пашня на месте ши-

роколиственно-еловых лесов; культурные сенокосы на месте осушенных низинных болот и заболоченных лугов.

Типы агроландшафтов выделяются исходя из степени химической мелиорированности, загрязнения, плодородия почв:

1. Слабо химически мелиорированные на осушенных дерновых и дерново-карбонатных заболоченных и торфяных почвах Доза ежегодно вносимых химических веществ 150–200 кг/га д.в.

2. Средне химически мелиорированные на дерново-подзолистых суглинистых и глинистых почвах, местами заболоченных и осушенных. Ежегодно вносится 201–250 кг/га д.в. минеральных удобрений.

3. Сильно химически мелиорированные на дерново-подзолистых супесчаных и песчаных почвах. Ежегодное внесение химических мелиорантов составляет 251–300 кг/га д.в.

4. Избыточно химически мелиорированные на заболоченных минеральных и торфяных почвах под овощными культурами и огородом. Ежегодно вносимые мелиоранты превышают более 300 кг/га д.в.

5. Геохимически токсичные – участки агроландшафтов с техногенным загрязнением.

Классы определяются по типоморфным элементам:

Кислый (H^+).

Кислый кальциевый (H^+, Ca^{2+}).

Кальциевый (Ca^{2+}).

Кислый глеевый (H^+, Fe^{2+}).

Кислый кальциевый глеевый (H^+, Ca^{2+}, Fe^{2+}).

Кальциевый глеевый (Ca^{2+}, Fe^{2+}).

Солянокислый (типоморфные ионы H^+, Cl^-).

Основной класс агроландшафтов Беларуси – кислые элювиальные с дерново-подзолистыми почвами, меньшее распространение имеют кислые глеевые супераквальные агроландшафты на полугидроморфных почвах. Другие классы локализованы на небольших площадях. Кислый кальциевый класс формируется искусственно известкованием почвы. Кислый кальциевый глеевый класс характерен при наличии жестких почвенно-грунтовых вод. Кальциевый глеевый класс приурочен к лугам и пастбищам на дерново-карбонатных заболоченных почвах. Солянокислый класс встречается в Солигорском районе.

Род агроландшафтов определяется по интенсивности водной миграции элементов, определяемой генезисом рельефа и литологией пород:

• Холмисто-моренный, среднедренированный на валунных суглинках и супесях с колебаниями относительных высот 10–30, реже до 50 м, с активной латеральной и средней радиальной миграцией химических элементов. Распространен в северной и центральной части Беларуси. Почвы кислые или слабокислые; окислительная обстановка в элювиальном агроландшафте сменяется на восстановительную глеевую в супераквальном.

• Лессовый дренированный на легких пылеватых суглинках с колебаниями относительных высот 2–5 м со слабой латеральной и средней радиальной ми-

грацией химических элементов. Распространены в средней Беларуси. Реакция почв слабокислая с окислительно-восстановительной средой.

• Озерно-ледниковый слабодренированный на ленточных глинах, тяжелых суглинках, реже озерных супесях и песках с колебаниями относительных высот 2–3 м со слабой латеральной и радиальной миграцией химических элементов. Реакция почвы кислая, слабокислая, окислительно-восстановительная и восстановительная глеевая среда.

• Водно-ледниковый умеренно дренированный на супесях и песках, реже суглинках с колебаниями относительных высот 2–10 м со средней латеральной и активной радиальной миграцией химических элементов. Реакция почвы кислая, местами слабокислая, господствует окислительная и окислительно-восстановительная обстановка.

• Моренно-зандровый слабодренированный на водно-ледниковых супесях и суглинках с колебаниями относительных высот 5–10 м, со средней латеральной и радиальной миграцией химических элементов. Реакция среды кислая, окислительная обстановка сменяется восстановительно-глеевой.

• Аллювиально-террасированный слабодренированный на аллювиальных и водно-ледниковых супесях и песках с относительными высотами 2–3 м, со слабой латеральной и активной радиальной миграцией химических элементов. Реакция почвы слабокислая, местами нейтральная, окислительная обстановка сменяется восстановительно-глеевой.

• Нерасчлененный с преобладанием болот слабодренированный на озерно-алллювиальных песчаных, реже супесчано-суглинистых отложениях, часто перекрытых торфом мощностью 0,5–12 м, с колебаниями относительных высот 0,5–2 м, с очень слабой латеральной и активной радиальной миграцией химических элементов. Реакция почвы от кислой до нейтральной, господствует окислительно-восстановительная и восстановительная глеевая обстановка.

Вид агроландшафтов – по степени аккумуляции элементов на геохимических барьерах. Геохимические барьеры в почвах проявляются раздельно или в сочетании. Выделены следующие виды агроландшафтов:

1. Сильной аккумуляции химических элементов. В этих агро-ландшафтах почвы имеют содержание физической глины более 40 % или высокое содержание органического вещества (дерновые и торфяные почвы). Выражен сорбционный, механический и биогенный барьеры.

2. Средней аккумуляции элементов. Почвы агро-ландшафтов содержат физической глины 20–40 % при содержании гумуса 1,5–5,0 %. Основные барьеры – сорбционный и биогенный.

3. Слабой аккумуляции химических элементов. Содержание физической глины в почве 5–20 %, количество гумуса не превышает 2,5 %. Слабо выражены все геохимические барьеры – сорбционный, механический и биогенный.

1.11. Методика ландшафтно-геохимического анализа города

Ландшафтно-геохимический анализ территории города выполняется для определения ее геохимической трансформации под воздействием хозяйственной деятельности. Выбор методики зависит от размера города, его природных и хозяйственных особенностей. Основным методом выступает сопряженный геохимический анализ по компонентам ландшафтов с изучениями миграции и зон концентрации элементов. Общая схема анализа следующая:

- оценка природного геохимического фона;
- геохимический анализ источников техногенного воздействия;
- исследование трансформации транзитных компонентов (воздух, вода);
- исследование трансформации депонирующих сред;
- комплексная эколого-геохимическая оценка городских ландшафтов;
- прикладные геохимические оценки.

Оценка природного геохимического фона. Фоновый уровень содержания элемента – средняя величина для диапазона значений, которые считаются природными (не обусловленными влиянием техногенеза). В зависимости от целей исследования используют глобальный, региональный или локальный фон. Региональный фон рассчитывается для страны в целом или геохимической провинции по представительным выборкам точек, удаленных от геохимических аномалий природного и техногенного происхождения. В качестве регионального фона используют: региональные кларки элементов (для Беларуси); содержания элементов в природных компонентах ООПТ; данные мониторинга фоновых территорий, осуществляемого в рамках национальной системы мониторинга.

Для определения локального геохимического фона избираются удаленные от города участки с природными условиями, аналогичными городским. Для изучения распределения элементов закладывается профиль-катена, пересекающий все типичные элементарные ландшафты. В точках опробования закладываются почвенные разрезы, опробуются воды и растения. При анализе полученных данных определяют статистические параметры распределения.

Геохимический анализ источников техногенного воздействия. Изучаются количеств техногенных источников на территории города, их расположение, мощность и качественный состав загрязняющих веществ. Основными источниками техногенными веществ являются: выбросы в атмосферу, сточные воды, твердые отходы производства и потребления. Особенностью городов является наложение полей воздействия различных производств и других видов хозяйственной деятельности с формированием техногенных геохимических аномалий в компонентах городского ландшафта. Для характеристики источников анализируют данные об их составе: 1) перечень и количество химических соединений, содержащихся в выбросах, стоках и отходах, 2) форму содержания элементов в соединениях 3) экологическую опасность элементов. Определяются приоритетные элементы-загрязнители.

Состав и качество атмосферного воздуха в городах определяются сложным сочетанием многих факторов: поступления веществ от источников, химических

преобразований в атмосфере; поступления веществ с трансграничным и региональным переносом. Такое многообразие процессов делает оценку содержания примесей в воздухе достаточно сложной задачей. Потому для оценки качества воздуха используются различные методы – физические, геохимические, биологические, методы моделирования.

Физические методы включают ежедневные инструментальные наблюдения в рамках системы мониторинга, а также дистанционные методы для выявления состава и структуры атмосферных аэрозолей. Состояние воздуха оценивается с помощью интегральных комплексных показателей. Методы моделирования пространственного распределения техногенных веществ в воздухе направлены на расчет концентраций примесей по данным об условиях их рассеивания.

Расчетные методы применяются для характеристики дисперсного состава пыли, содержащейся в атмосферном воздухе. Установлено, что чем меньше частицы пыли, тем дольше они находятся в воздухе, тем больше вероятность их поступления в дыхательные пути человека; в качестве порогового размера пылевых частиц обычно рассматривается их аэродинамический диаметр 10 мкм. При этом элементы с большими кларками (марганец, цинк, хром, медь) связаны с крупнодисперсными частицами, а элементы с низкими кларками - наиболее токсичны (кадмий, свинец, сурьма, мышьяк, ртуть) - (менее 0,05 мкм) или парогазовой фазе аэрозоля.

Геохимические методы используют для косвенной оценки состава атмосферного воздуха, чаще всего по данным снеговой съемки. Снег обладает высокой сорбционной способностью и осаждает из атмосферы значительную часть элементов-примесей. Опробование снега проводится по регулярной сети или векторным способом. Пробы снега растапливают, фильтруют. Содержание элементов определяется отдельно в растворенной и твердой фракциях снега, так как источники их поступления могут быть разными. На долю пылевой фракции приходится обычно 70–80 % элементов в пробах снега.

На урбанизированных территориях химический состав снега подвергается трансформации: увеличивается минерализация, меняется химический состав – возрастает доля хлоридов, сульфатов, натрия и железа, МК. Изучение пространственного распределения микроэлементов позволяет индицировать местоположение источников выбросов.

Лихеноиндикация оценивает состояние воздуха по изменению структуры сообществ эпифитных лишайников.

В атмосферном воздухе городов определяются концентрации основных загрязняющих веществ (взвешенных веществ, диоксидов серы и азота, оксида углерода), а также специфических (формальдегида, аммиака, фенола, сероводорода, сероуглерода). Большая часть оксидов углерода, азота обусловлена работой автотранспорта. А диоксид серы и твердые частицы поступает в атмосферу от стационарных источников. В воздухе городов Беларуси большинство примесей находится в концентрациях не превышающих величин ПДК. Только концентрации формальдегида часто превышают норму. Его вклад в суммарный индекс загрязнения составляет до 80 %, за счет автомобильного транспорта. С

воздействием транспорта связаны также выбросы высокотоксичного бенз(а)пирена.

Поступление городских стоков в реки и водоемы приводит к значительной трансформации химического состава вод. Для исследования отбираются водные пробы всех типов: речные воды выше и ниже города, сточные воды, подземные воды – из скважин и шахтных колодцев. Основными гидрохимическими показателями являются компоненты солевого состава (Cl, SO_4, Na, K), содержание N, P, Fe, нефтепродуктов и ТМ (Zn, Ni, Cd, Ag).

В донных отложениях водотоков формируются геохимические аномалии. Техногенные илы характеризуются сходной ассоциацией элементов с повышенной концентрацией Hg, Ag, Cd, Cu, Zn, Cr. Техногенные илы, депонируя загрязняющие вещества, их задерживают, однако при этом длительное время являются вторичным источником загрязнения вод, пойменных ландшафтов, а химические реакции и микробиологические процессы, происходящие в них, способствуют образованию подвижных и токсичных соединений элементов.

Почвенный покров является основным объектом геохимических исследований в городах. Уменьшение площади естественных почв, изменение их физико-химических свойств, загрязнение влияют на состояние городских экосистем.

Почвенный покров городов отличается сложностью и неоднородностью. Наряду с почвами, сохранившими естественное состояние, на территории городов распространены антропогенно преобразованные почвы и запечатанные искусственным покрытием поверхности. Непосредственно термином «городские почвы» называют антропогенно измененные почвы, имеющие преобразованный поверхностный слой мощностью более 50 см, полученный перемешиванием, насыпанием, загрязнением материала урбаногенного происхождения, в том числе строительно-бытовым мусором. Продукты техногенеза накапливаются в верхних горизонтах почв, включаются в природные миграционные циклы. Для определения техногенной трансформации городских почв их сравнивают с природным фоном.

Геохимический анализ почв в городах выполняется с целью: выявления геохимических аномалий и их генезиса, исследования соотношения форм соединений техногенных элементов, определения устойчивости к техногенезу, выявления педогеохимических барьеров.

Изучение состояния почв города начинается со сплошного сетевого геохимического опробования поверхностных горизонтов (0–10 см) почв с учетом ландшафтной ситуации и функциональных зон. Густота сети зависит от масштаба исследований и составляет от 1 до 10 точек на 1 км^2. Отбираются пробы на задернованных целинных участках с ненарушенным почвенным покровом. Смешанный образец составляется из единичных проб методом конверта,. В районах интенсивных техногенных нагрузок закладываются дополнительные точки отбора, т.е. сеть почвенно-геохимической съемки сгущается. В зонах интенсивного техногенного воздействия выполняется также почвенно-геохимическое профилирование. Выбор линий профилей производится с таким расчетом, чтобы проследить изменение концентраций техногенных веществ с

удалением от источников и оценить неоднородность почв по способности к их накоплению.

Анализ химического состава почв выполняется с использованием эмиссионного спектрального метода и атомно-абсорбционной спектроскопии. Эмиссионным спектральным методом определяются концентрации более 30 элементов (никеля, кобальта, марганца, титана, ванадия, хрома, свинца, циркония, меди, цинка, бериллия, ниобия, скандия, серебра, молибдена, галлия, вольфрама, иттрия, иттербия, германия, таллия, гафния, висмута, сурьмы, стронция, селена, олова, бора, мышьяка). Чувствительность определения для разных элементов составляет 0,1–n10 мг/кг. С помощью атомно-абсорбционной спектроскопии выполняется определение содержания свинца, кадмия, цинка, меди, никеля, хрома, марганца. Чувствительность определения составляет 0,1–n1,0 мг/кг. Этим же методом с использованием солянокислой и ацетатно-аммонийной вытяжек определяется содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах и других твердых субстратах. Изучение содержания водорастворимых веществ в почве выполняется агрохимическими методами в водных вытяжках из почв. Определение нефтепродуктов в образцах почв производится флуоресцентным методом или ИК-спектроскопии, основанном на экстракции нефтепродуктов из почвы четыреххлористым углеродом. Почва в значительной степени способна иммобилизовать соединения металлов за счет процессов сорбции, реакций гидролиза, осаждения на органических и неорганических компонентах ППК, переводя их в неподвижные и недоступные для растений формы. Поэтому данные о валовом содержании металлов в почве не всегда могут указать на опасность ее загрязнения. В связи с этим изучается соотношение валовых и подвижных, доступных для растений, форм содержания металлов в почвах. Основным методом интерпретации и анализа данных является почвенно-геохимическое картографирование. При этом составляются моноэлементные карты и карты суммарного загрязнения.

Установлено, что почвы городских территорий могут существенно отличаться от своих аналогов в пределах природной зоны. Среди изменений следует отметить: подщелачивание городских почв, увеличение содержания органического вещества и элементов питания растений, изменение макро- и микроэлементного состава почв.

Подщелачивание обусловлено осаждением на поверхность почвы строительной и другой пыли, содержащей карбонаты кальция и магния. Подщелачивание почв городов возможно также и за счет золы, образующейся при сгорании большинства видов топлив и имеющей щелочную реакцию. Кроме того, под действием осадков с большим количеством растворенной углекислоты, в почвах происходит образование бикарбонатов, которые являются гидролитически щелочными солями. Результаты исследований свидетельствуют об обогащении городских почв гумусом, тяжелыми металлами. При значительном загрязнении почва теряет способность к продуктивности, происходит потеря экологических функций и гибель урбоэкосистемы. Наиболее контрастные аномалии металлов приурочены к промышленным площадкам, локальным очистным сооружениям, местам складирования отходов.Из тяжелых металлов приоритет-

ными загрязнителями почв городов Беларуси являются свинец и цинк с превышением фона в 1,5 и более раз. Влияние автотранспорта на загрязнение почв связано с выбросами тяжелых металлов (прежде всего, свинца, цинка, кадмия) и накоплением нефтепродуктов. Выявлено, что около 2/3 загрязнителей оседает в 10–30 метровой придорожной полосе. При этом уровень загрязнения почв зависит от интенсивности движения транспорта, срока эксплуатации дороги, особенности ландшафтно-геохимических условий.

1.12. Растительный покров города. Эколого-геохимическая оценка влияния на пригородные ландшафты

Отличительной чертой растительного покрова городов является его неоднородность. Естественная растительность лесов, пустырей сочетается с культурными насаждениями скверов, внутриквартальных посадок, а также приусадебных участков, на которых выращивается сельскохозяйственная продукция.

Городские растения испытывают негативное воздействие значительного числа веществ-загрязнителей: оксидов серы, азота и углерода, тяжелых металлов, соединений фтора, углеводородов и др. Наибольшую опасность для растений представляют выбросы в атмосферу диоксида серы, содержащегося в продуктах сгорания топлива, а также фтористого водорода, образующегося при производстве алюминия и фосфатов.

Биогеохимический анализ основан на исследовании элементного состава растений. Растения очень чутко реагируют на техногенные изменения состояния городской среды, однако изменение их химического состава – очень сложный и многофакторный процесс. Оно зависит от вида растений, содержания и форм нахождения элементов в почвах, воздухе.

Техногенные соединения поступают в растения механическим путем из воздуха и в растворенном виде из загрязненных почв. Распространено некорневое поглощение тяжелых металлов (ТМ) из воздуха листьями деревьев вблизи интенсивных источников. ТМ, поглощенные листьями, могут переносится в другие органы и включаться в обмен веществ. Механизмы устойчивости растений к избытку ТМ могут проявляться по-разному: одни виды способны накапливать высокие концентрации ТМ, но проявлять к ним толерантность; другие стремятся снизить их поступление путем использования барьерных функций.

При выявлении биогеохимических аномалий в качестве биопроб используются листья, молодые побеги, кора наиболее распространенных в городе видов древесных растений, выбирают доминирующие на территории города породы деревьев, чаще всего тополь, липу, березу, сосну, Отбор проб растительного материала, как правило, производится в процессе комплексной ландшафтно-геохимической съемки, одновременно с почвенным опробованием. Изучение содержания ТМ в древесных растениях городов Беларуси выявило наличие аномалий вокруг интенсивных источников.

Изучается на территории городов также накопление элементов в выращиваемой с/х продукции, которая тоже может содержать значительные количества тяжелых металлов. Получены данные о повышенном содержании металлов в

овощах с превышением ПДК по цинку, кадмию и свинцу. Наиболее высокое содержание ТМ обнаружено в листовых овощах (салат, капуста) и силосных культурах, наименьшее – в бобовых, злаковых и технических культурах. Проблемой выращивания сельскохозяйственных растений на приусадебных участках городов может быть нитратное загрязнение продукции, что обусловлено, бытовым загрязнением почв и грунтовых вод, избыточным внесением удобрений.

Эколого-геохимическая оценка влияния городов на окружающие ландшафты. Влияние зависит от характеристик источников выбросов, стоков, отходов на территории города, структуры промышленности, природных факторов. Отдельно оценивается влияние города в результате атмосферных выпадений; влияние, связанное с переносом загрязненных речных вод; влияние, связанное со складированием отходов на пригородных территориях.

В результате атмосферных выпадений тяжелых металлов формируются геохимические аномалии в задернованных почвах и растениях (выше фона содержание свинца, кадмия, цинка, меди и никеля) пригородных ландшафтов..

В результате выноса техногенных соединений наблюдается накопление тяжелых металлов в почвах пойм ниже городов. Содержание никеля, хрома и меди в пойменных почвах может превышать фон, повышено также содержание цинка, олова и серебра. При этом высока доля подвижных форм металлов, что сказывается на концентрации элементов в растительности.

Полигоны складирования промышленных и бытовых отходов являются локальными источниками загрязнения пригородных ландшафтов. В субстратах полигонов накапливаются тяжелые металлы, нефтепродукты, водорастворимые соли. В химическом составе фильтратных вод среди катионов чаще преобладают аммоний, калий или натрий, среди анионов - хлориды и сульфаты. С водными потоками техногенные вещества мигрируют как в растворенном, так и во взвешенном виде. В почвах вблизи полигонов наблюдается накопление цинка, меди, свинца, никеля и кадмия в концентрациях, превышающих ПДК. В аномально высоких количествах обнаруживаются в них также хром, олово, марганец, ванадий и молибден. Максимальные концентрации металлов в пределах зон воздействия полигонов зафиксированы в верхних горизонтах торфяно-болотных почв.

1.13. Комплексная оценка состояния городской среды. Оценка экологического риска

Комплексная оценка состояния городской среды – один из наиболее важных этапов геоэкологических исследований, выполняется 1) интеграция покомпонентных оценок в границах ландшафтных выделов, 2) зонирование территории города по уровню экологической благоприятности, 3) выделение проблемных участков и определение природоохранных приоритетов на территории города.

Методика комплексной эколого-геохимической оценки предполагает следующую последовательность работ:

- Составление ландшафтно-геохимической карты города;
- выбор территориальной единицы оценки;
- оценка состояния природных компонентов (атмосферного воздуха, почвенного покрова, подземных вод и растительности) по интегральным показателям;
- комплексная оценка экологического состояния;

Деление территории на городские элементарные ландшафты учитывает ее природную неоднородность и функциональное зонирование (в пределах выделов прогнозируется одинаковое поведение техногенных элементов и соединений).

Выбор территориальной единицы оценки осуществляется так, чтобы ее можно было использовать в дальнейшем при планировании оптимизационных мероприятий. Выделы должны характеризоваться однородными ландшафтными условиями, одинаковым функциональным использованием (единицы градостроительного проектирования) и близкими по характеру и интенсивности техногенными нагрузками. Таким критериям соответствуют ландшафтно-планировочные районы, которые определяются по градостроительным схемам с учетом характеристик преобладающих элементарных ландшафтов (более 50 %). В пределах каждого района выделяются подрайоны по ландшафтно-геохимической однородности и близкой реакции на техногенные воздействия.

Для получения интегральных покомпонентных оценок составляется эколого-геохимическая картосхема города. На ней отражаются источники техногенного воздействия (предприятия, накопители отходов, места сброса сточных вод); зоны загрязнения воздуха, подземных вод, почв – аномалии содержания ТМ, водорастворимых веществ и нефтепродуктов.

Для интегральной оценки состояния атмосферного воздуха применяется комплексный показатель, который характеризует уровень загрязнения воздуха основными и специфическими загрязняющими веществами по данным мониторинга. Также используются результаты снеговой съемки. Состояние грунтовых и поверхностных вод определяется по соотношению с нормами ПДК их минерализации, содержания основных компонентов ионного состава, загрязнителей. В составе подземных вод учитываются только грунтовые воды, залегающие близко от поверхности и оказывающие существенное влияние на состояние экосистем. Поверхностные воды в общей оценке учитываются не всегда, что обусловлено особенностями формирования гидрографической сети и сложностью увязки показателей с другими компонентами. Первоначально выделяются функционально-планировочные районы, в пределах которых высока доля супераквальных, транссупераквальных (пойменных) и элювиально-аккумулятивных ландшафтов, где грунтовые воды залегают не глубже 4 м.

Состояние почвенного покрова обычно оценивается по величине суммарного показателя загрязнения почв тяжелыми металлами (Z_c) по пяти элементам: кадмий, свинец, медь, никель и цинк. Также используются показатели: встречаемость проб с превышением ПДК/ОДК по каждому элементу, количество элементов, по которым превышены ПДК; выявленное или потенциальное загряз-

нение почв стойкими органическими загрязнителями (ПАУ и ПХБ), нефтепродуктами. Зонирование территории города по степени загрязнения почв, как и для других компонентов, проводится применительно к функциональным зонам.

Показателем интегральной оценки состояния древесных насаждений является категория жизненного состояния древостоев.

Эколого-геохимический подход к оценке экологического риска предполагает использование фактических данных геохимического обследования. Экологический риск оценивается в каждой точке опробования с последующим анализом пространственного распределения на территории.

Для оценки риска используются концепции референтной дозы (допустимого суточного потребления) и референтной концентрации (аналог ПДК). Референтная доза – допустимое поглощение загрязнителя (на 1 кг массы тела в день). Ее используют для оценки риска перорального воздействия (при поступлении в организм загрязняющих веществ с водой и пищей) Референтную концентрацию используют для оценки ингаляционного воздействия (из загрязненного воздуха).

При оценке ингаляционного экологического риска в связи с загрязнением воздуха в городах Беларуси используют данные расчета рассеивания загрязняющих веществ на их территории («Эколог»). Пероральное воздействия обусловлено поступлением в организм человека загрязняющих веществ с питьевой водой и пищей. Величина экологического риска при пероральном воздействии рассчитывается как мера опасности поступления в организм элемента, равная отношению дозовой нагрузки элемента к референтной дозе элемента. Дозовая нагрузка определяется как произведение концентрации элемента в продукте питания на величину суточного потребления продукта. Концентрации измеряются во время полевых обследований, суточное потребление рассчитывается, референтные дозы рекомендует Всемирная организация здравохранения.

Полный курс лекций приведен в учебном пособии: Геохимия ландшафта: учеб. пособие / Н.К. Чертко, Н.В. Ковальчик, В.С. Хомич, А.А. Карпиченко, П.В. Жумарь, Т.А. Тимофеева; под ред. Н.К. Чертко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: БГУ, 2011. – 303 с. / Электронная библиотека БГУ. – Режим доступа: http://elib.bsu.by/handle/123456789/44211 – Дата доступа 25.11.2019.

Дополнительно о свойствах химических элементов, их содержании в природных средах, заболеваниях, вызываемых избытком или недостатком в организме человека информация приведена в справочном пособии Геохимия и экология химических элементов: Справочное пособие / Н.К. Чертко, Э.Н. Чертко [электронный ресурс] / Электронная библиотека БГУ. – Режим доступа: http://http://elib.bsu.by/handle/123456789/18337. – Дата доступа 25.11.2019.

Презентации лекций по дисциплине «Геохимия ландшафта» доступны на сайте факультета географии и геоинформатики БГУ https://geo.bsu.by/index.php/departments/soil-science/present.html.

2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Практические работы

Тема 1. Составление карты геохимических ландшафтов административного района Беларуси

Форма выполнения работы: Составление электронной карты геохимических ландшафтов одного из административных районов Беларуси (по вариантам) в среде ГИС ArcGIS по данным тематических карт Национального атласа Беларуси (2002).

При выполнении типологического ландшафтно-геохимического картографирования выявляются закономерности размещения элементарных и геохимических ландшафтов. В основе составления таких карт лежат представления о ландшафте как потоковой геосистеме, свойства которой обусловлены связями между климатом, горными породами, рельефом, почвами и растительным покровом.

Цель работы: Освоить методику ГИС-картографирования геохимических ландшафтов, используя данные тематических карт; дать характеристику ландшафтов, руководствуясь типологическими критериями их классификации и построенной картой.

Методика выполнения работы приведена в учебно-методическом пособии ГИС-картографирование и геохимический анализ ландшафтов. Практикум по геохимии ландшафтов : учеб.-метод. пособие / Н. В. Ковальчик, Н. В. Жуковская [электронный ресурс] / Электронная библиотека БГУ. – Режим доступа: elib.bsu.by/handle/123456789/229856

Тема 2. Определение фоновых и аномальных содержаний химических элементов

Форма выполнения работы: Расчет статистических показателей и построение графиков распределения (по вариантам) на основе выборки данных содержания химических элементов в почвах национального парка «Нарочанский».

Для количественной характеристики состояния окружающей среды результаты анализов геохимических проб подвергаются статистической обработке. Определяется величина местного геохимического фона изучаемых элементов в почвах, водах, растениях для каждого ландшафта. Уровень фонового содержания элемента отвечает наиболее вероятному его значению для участка, где отсутствуют геохимические аномалии. Определение фона возможно после установления закона, которым аппроксимируется распределение содержаний элемента. Чаще всего распределение содержаний элементов в выборке подчиняется нормальному и логнормальному законам.

Цель работы: рассчитать величины фоновых (среднее значение, стандартное отклонение/стандартный множитель, размах) и минимально аномальных значений содержания химических элементов в почвах национального парка и проанализировать сходство и различия распределения элементов в выборках.

Методика выполнения работы приведена в учебно-методическом пособии ГИС-картографирование и геохимический анализ ландшафтов. Практикум по геохимии ландшафтов : учеб.-метод. пособие / Н. В. Ковальчик, Н. В. Жуковская [электронный ресурс] / Электронная библиотека БГУ. – Режим доступа: elib.bsu.by/handle/123456789/229856

Тема 3. Геохимическая структура ландшафтов

Форма выполнения работы: Построение графиков, расчет коэффициентов и заполнение таблиц анализа элементной геохимической структуры по данным полевых и лабораторных исследований содержания химических элементов в почвах элементарных ландшафтов Беларуси.

Методология геохимии ландшафта предполагает изучение территориально сопряженных ландшафтов как подсистем, связанных потоками вещества и энергии. При этом для количественного определения тесноты связей между подсистемами и внутри них используются данные содержания химических элементов в почвах, водах, растениях. Для характеристики ландшафтов применяют понятие «фоновая геохимическая структура», которая определяет соотношения между подсистемами в виде набора ландшафтно-геохимических коэффициентов (радиальной и латеральной дифференциации, водной миграции, биогеохимического поглощения и др.). Фоновая почвенно-геохимическая структура характеризует вертикальную (R-анализ) и горизонтальную, или склоновую, (L-анализ) дифференциацию ландшафтов.

Цель работы: Анализ геохимической структуры ландшафтов Беларуси (по вариантам) путем оценки диапазона содержания элементов в почвах элементарных ландшафтов и типичных катен.

Методика выполнения работы приведена в учебно-методическом пособии ГИС-картографирование и геохимический анализ ландшафтов. Практикум по геохимии ландшафтов : учеб.-метод. пособие / Н. В. Ковальчик, Н. В. Жуковская [электронный ресурс] / Электронная библиотека БГУ. – Режим доступа: elib.bsu.by/handle/123456789/229856

Тема 4. Построение моноэлементных карт содержания техногенных элементов в почвах города. Суммарный показатель загрязнения почв

Форма выполнения работы: Построение электронных карт содержания Zn, Pb, Cu в почвах города и карты суммарного загрязнения почв в среде ГИС ArcGIS. Исходные данные: шейп-файлы границ, гидрографии, дорог, кварталов, ландшафтов, пунктов опробования почв г. Светлогорска; данные полевых и лабораторных исследований содержания химических элементов в почвах города.

Поступление техногенных веществ в почвы городов приводит к их механической, физической и химической трансформации. Продукты техногенеза включаются в природные миграционные циклы. При значительном химическом загрязнении почва теряет способность к продуктивности и биологическому са-

моочищению. Геохимический анализ почв в городах выполняют с целью выявления педогеохимических аномалий и их генезиса, исследования соотношения форм соединений, устойчивости почв к техногенезу.

Одним из основных методов интерпретации геохимических данных является почвенно-геохимическое картографирование. На моноэлементных картах отображают содержание отдельных техногенных элементов. Карты составляются по данным полевого геохимического опробования, строятся преимущественно методом изолиний. Для того, чтобы зафиксировать отклонение содержания элемента от природного значения, выполняют его сопоставление с фоном и показателем ПДК/ОДК. Карты суммарного загрязнения показывают отклонение от фоновых значений выявленной ассоциации элементов-загрязнителей.

Цель работы: Освоить методику электронного картографирования и анализа педогеохимических аномалий тяжелых металлов в почвах города.

Методика выполнения работы приведена в учебно-методическом пособии ГИС-картографирование и геохимический анализ ландшафтов. Практикум по геохимии ландшафтов : учеб.-метод. пособие / Н. В. Ковальчик, Н. В. Жуковская [электронный ресурс] / Электронная библиотека БГУ. – Режим доступа: elib.bsu.by/handle/123456789/229856

Тема 5. Выделение и картографирование ассоциаций химических элементов

Форма выполнения работы: Выявление ассоциаций химических элементов и их картирование в среде ГИС ArcGIS с помощью модифицированного для целей работы инструмента-скрипта *Factor Analysis for Mixed Data* [CHANS-tools]. Скрипт написан на языке R, использует библиотеки FactoMineR [Lê, S.] и missMDA и выполняет факторный анализ на основе количественных и качественных показателей. Добавление инструмента предполагает предустановленный R-ArcGIS Bridge [R ArcGIS]. Исходные данные: шейп-файлы границ, гидрографии, ландшафтов, пунктов опробования почв национального парка «Нарочанский»; данные полевых и лабораторных исследований содержания химических элементов в почвах национального парка в формате MS Excel.

Одной из задач геохимического исследования природных объектов является выделение и анализ парагенных ассоциаций химических элементов, сходно (как по интенсивности, так и по знаку) реагирующих на изменения параметров среды и характеризующихся в связи с этим сопряженностью и однонаправленностью изменения их содержания в пространстве объекта. Во многих случаях парагенезис элементов связан с их совместной миграцией и определяется внешними и внутренними факторами миграции.

Для выделения ассоциаций химических элементов могут быть использованы методы многомерного статического анализа и, в частности, метод факторного анализа. Гипотеза факторного анализа о существовании небольшого числа скрытых (латентных) факторов, через которые линейно выражаются все анализируемые переменные и в которых содержится вся существенная информация,

соответствует понятию парагенетических ассоциаций, которые должны быть обусловлены одним общим геохимическим процессом или источником поступления элементов.

Цель работы: Выделить и картографировать в среде ГИС ArcGIS методом факторного анализа ассоциации химических элементов в почвах фоновой территории, выявить особенности их пространственной дифференциации.

Методика выполнения работы приведена в учебно-методическом пособии ГИС-картографирование и геохимический анализ ландшафтов. Практикум по геохимии ландшафтов : учеб.-метод. пособие / Н. В. Ковальчик, Н. В. Жуковская [электронный ресурс] / Электронная библиотека БГУ. – Режим доступа: elib.bsu.by/handle/123456789/229856

3. РАЗДЕЛ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

3.1. Перечень тестов и контрольных заданий

Тесты и контрольные задания проводятся в течение шестого семестра по следующим темам:

1. Геохимическая классификация природных ландшафтов
2. Геохимическая структура ландшафтов
3. Геохимическая характеристика ландшафтов природных зон
4. Геохимия азональных ландшафтов
5. Геохимия Мирового океана
6. Геохимия агроландшафтов
7. Геохимическая классификация городских ландшафтов
8. Методика геохимического картографирования и районирования городских ландшафтов
9. Геохимическая трансформация компонентов городских ландшафтов.
10. Комплексная эколого-геохимическая оценка состояния городской среды.

Примеры тестовых заданий по указанным темам:

1. К каким элементам рельефа приурочены трансэлювиальные элементарные ландшафты?
2. Какие критерии использует Глазовская для классификации супераквальных ландшафтов?
3. Назовите вид радиальной почвенно-геохимической структуры, при которой самое высокое содержание элемента наблюдается в нижнем горизонте.
4. Назовите вид латеральной почвенно-геохимической структуры, при которой самое высокое содержание элемента наблюдается в почвах элювиального ландшафта.
5. На каком почвенно-геохимическом барьере элементы Fe, Mn, Co переходят в нерастворимую форму?
6. Гидрокарбонатно-кремниевый состав характерен для вод ландшафтов:
   зоны широколиственых лесов *мангровых лесов*
   зоны тайги *влажных тропических лесов*
7. Минерализация вод зоны степей:
   ультрапресные *пресные*
   слабозасоленные *соленые*
8. Вторичные глинистые минералы, наиболее устойчивые к условиям влажных тропических лесов:
   гидрослюды *смешаннослоистые минералы*
   монтмориллониты *каолиниты*
9. Ландшафты тундры относятся к классу:
   кальциевому *кислому глеевому*

соленосно-сульфидному *сернокислому*

10. Интенсивность БИКа выше в ландшафтах:
    тундры *степей*
    тайги *пустынь*
11. Зольность ниже в растениях:
    тундры *пустынь*
    степей *влажных тропических лесов*
12. Какие критерии положены в основу выделения порядков, отделов в геохимической классификации городских ландшафтов:
    техногенные *природные*
13. Наиболее токсичные отходы, содержащие в высоких количествах тяжелые металлы:
    шлаки металлургических предприятий *отходы деревообработки*
    осадки очистки гальванических стоков *отходы минерального сырья*
14. С какой глубины отбираются образцы почв при проведении сплошного сетевого геохимического опробования?
    0-10 см *0-40 см* *30-40 см* *0-70 см*
15. Формула расчета суммарного показателя загрязнения (Z_c)?
16. Какими факторами обусловлено подщелачивание городских почв?
17. На каких геохимических барьерах в почвах накапливаются нефтепродукты?
18. Какие растения используются для биогеохимической индикации качества городской среды?
19. Какие пробы отбираются для геохимической оценки экологического риска, связанного с пероральным воздействием на городских жителей?
    Пробы сельхозпродукции *Пробы питьевых вод*
    Пробы почв *Пробы атмосферного воздуха*
20. Каковы особенности радиальной дифференциации тяжелых металлов в почвах городов по сравнению с фоном?

3.2. Вопросы к зачету по дисциплине

1. Предмет и история развития геохимии ландшафта
2. Критерии геохимических классификаций элементов.
3. Классификация А.И. Перельмана. Элементы – очень подвижные и подвижные водные мигранты.
4. Классификация А.И. Перельмана. Элементы – водные мигранты, подвижные и слабоподвижные в отдельных геохимических обстановках (окислительной, восстановительных глеевой, сероводородной).
5. Классификации геохимических ландшафтов.
6. Классификация элементарных ландшафтов А.И. Перельмана.
7. Таксономические единицы классификации природных ландшафтов Беларуси. Анализ карты «Геохимические ландшафты» Беларуси.
8. Геохимическая структура ландшафтов.

9. Виды латеральных геохимических структур Беларуси.
10. Виды радиальных геохимических структур Беларуси.
11. Геохимическая классификация агроландшафтов Беларуси.
12. Особенности химического состава агроландшафтов.
13. Природные и техногенные геохимические барьеры.
14. Геохимическая систематика городов.
15. Геохимическая классификация городских ландшафтов.
16. Методика ландшафтно-геохимического анализа города.
17. Оценка природного геохимического фона.
18. Приоритетные элементы-загрязнители городской среды.
19. Трансформация химического состава атмосферного воздуха в городах.
20. Трансформация химического состава вод и донных отложений городов.
21. Геохимические особенности почв городов.
22. Тяжелые металлы в почвах городов.
23. Биогеохимическая индикация состояния городской среды.
24. Комплексная эколого-геохимическая оценка состояния городской среды.
25. Методы геохимического картографирования городских ландшафтов.
26. Геохимические аномалии пригородных территорий, обусловленные влиянием города.
27. Геохимическая характеристика ландшафтов зоны влажных тропических лесов.
28. Геохимическая характеристика ландшафтов зоны субтропических лесов.
29. Геохимическая характеристика ландшафтов зоны широколиственных лесов.
30. Геохимическая характеристика ландшафтов зоны хвойных лесов.
31. Геохимическая характеристика ландшафтов зоны хвойно-лиственных лесов Беларуси.
32. Геохимическая характеристика ландшафтов зоны саванн.
33. Геохимическая характеристика ландшафтов зоны сухих степей субтропического пояса.
34. Геохимическая характеристика ландшафтов зоны луговых степей суббореального пояса.
35. Геохимическая характеристика ландшафтов зоны сухих степей суббореального пояса.
36. Геохимическая характеристика ландшафтов зоны пустынь тропического пояса.
37. Геохимическая характеристика ландшафтов зоны пустынь суббореального пояса.
38. Геохимическая характеристика ландшафтов зоны пустынь холодного пояса.
39. Геохимическая характеристика ландшафтов зоны тундры
40. Геохимическая характеристика ландшафтов верховых болот.

41. Геохимическая характеристика ландшафтов пойм и дельт.
42. Геохимическая характеристика вулканических ландшафтов.
43. Геохимическая характеристика ландшафтов Мирового океана.
44. Геохимия донных осадков Мирового океана.
45. Тип химизма растений по типам ландшафта (природным зонам).
46. Сравнительный химический состав вод по типам ландшафта (природным зонам).

3.3. Организация самостоятельной работы

Самостоятельная работа ведется на основании Положения о самостоятельной работе студентов (курсантов, слушателей), утвержденном Министром образования Республики Беларусь от 06 апреля 2015 г.

По изучаемой дисциплине планируется:
- выполнение творческих, исследовательских заданий;
- работа с литературными источниками, в том числе с научными статьями;
- изучение тем и проблем, не выносимых на лекции;
- научные доклады;
- написание тематических докладов и эссе на проблемные темы.

Перечень рекомендуемых средств диагностики
- коллоквиумы;
- электронные тесты;
- проверка расчетно-графических работ;
- оценивание на основе модульно-рейтинговой системы;
- оценивание на основе проектного метода.

Методика формирования итоговой оценки

Итоговая оценка формируется на основе 3-х документов:
1. Правила проведения аттестации (Постановление № 53 от 29 мая 2012 г.);
2. Положение о рейтинговой системе БГУ;
3. Критерии оценки студентов (10 баллов).

3.4. Перечень заданий по управляемой самостоятельной работе студентов

УСР 1. Структурная геохимическая модель ландшафтов природной зоны
Форма контроля – отчет.
УСР 2. Влияние минеральных удобрений на химическое загрязнение агроландшафтов
Форма контроля – отчет.
УСР 3. Определение нагрузки тяжелых металлов в составе твердых атмосферных выпадений в городах Беларуси
Форма контроля – отчет.

4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

4.1. Учебно-методическая карта по учебной дисциплине для специальностей 1-56 02 02 «Геоинформационные системы» и 1-31 02 01 География

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
1	**Закономерности миграции химических элементов (2 часа)**	**2**						
1.1	Тема 1.1. Предмет и задачи курса. Элементарный ландшафт и его виды. Геохимический ландшафт. Внутренние и внешние факторы миграции химических элементов. Геохимические процессы. Роль геохимических барьеров в концентрации химических элементов.	1						Тестовое задание
1.2	Тема 1.2. Формы миграции химических элементов. Формы водной миграции: ионная, молекулярная, суспензионная, коллоидная, с живыми и отмершими организмами. Основные органические соединения и их роль в живых организмах. Роль гидролиза, окисления, гумификации, минерализации в трансформации органического вещества. Оценка биогенной миграции и аккумуляции химических элементов. Геохимическая классификация элементов.	1						Тестовое задание
2	**Геохимия природных ландшафтов (26 часов)**	**14**	**8**				**4**	
2.1	Тема 2.1. Геохимическая классификация ландшафтов. Таксономические единицы и критерии их выделения в классификациях А.И. Перельмана, М.А. Глазовской, В.Б. Сочавы. Методика составления ландшафтно-	2						Тестовое задание

	геохимических карт. Геохимическая классификация природных ландшафтов Беларуси: таксономические единицы и критерии их выделения. Анализ геохимической карты Беларуси. Геохимическая классификация агроландшафтов: таксономические единицы и критерии их выделения. Анализ карты агроландшафтов Беларуси.							
2.1.1.	ГИС-практикум в среде ГИС ArcGIS: Составление ландшафтно-геохимической карты административного района Беларуси.		4					Проверка расчетно-графических работ (РГР)
2.2	Тема 2.2. Геохимическая структура ландшафтов. Типология, таксономические единицы и критерии выделения геохимической структуры ландшафтов. Виды латеральных и радиальных геохимических структур. Анализ геохимических структур на примере озерно-ледникового ландшафта. Геохимическая структура ландшафтов Беларуси на уровне рода. Методика оценки разнообразия геохимической структуры ландшафта: низкое, типичное, высокое разнообразие.	2						Тестовое задание
2.2.1.	Практикум в среде Excel: Геохимическая структура ландшафтов Беларуси		4					Проверка РГР
2.3	Тема 2.3. Геохимия лесных ландшафтов. Экваториальные, субэкваториальные, тропические леса. Субтропические леса. Широколиственные леса суббореального пояса. Хвойные леса бореального пояса. Геохимия ландшафтов хвойно-лиственных лесов Беларуси. Закономерности миграции, концентрации и рассеяния химических элементов в коре выветривания, почвах, водах и растениях. Оценка биологического круговорота (БИКа) химических элементов. Саморегуляция природных ландшафтов. Способы геохимической оптимизации ландшафтов. Возможные биогеохимические эндемии. Систематика ландшафтов: типы, семейства, классы; геохимические особенности, практические аспекты. Геохимическая характеристика ландшафтов Беларуси.	4						Тестовое задание
2.3.1.	Самостоятельная работа: Структурная геохимическая модель лесных ландшафтов.						4	Проверка РГР
2.4	Тема 2.4. Геохимия степных ландшафтов. Типы степных ландшафтов. Са-	2						Тестовое

	ванны. Сухие степи субтропического пояса. Луговые степи суббореального пояса. Сухие степи суббореального пояса. Общая геохимическая характеристика. Основные черты водной, воздушной и биогенной миграции. Засоление и рассоление. Оценка БИКа химических элементов. Саморегуляция, способы оптимизации степных ландшафтов. Возможные биогеохимические эндемии. Систематика ландшафтов: типы, семейства, классы; геохимические особенности, практические аспекты.							задание
2.5	Тема 2.5. Геохимия ландшафтов пустынь. Пустыни субтропического и тропического пояса. Пустыни суббореального пояса. Пустыни холодного пояса и высокогорных районов. Сравнительный анализ типов пустынь по химизму коры выветривания, почв, вод и растений. Оценка БИКа, геохимические способы оптимизации ландшафтов, специфика биогеохимических эндемий. Систематика ландшафтов: типы, семейства, классы. Геохимия ландшафтов тундры. Особенности геохимических процессов. Факторы миграции, оценка БИКа химических элементов. Систематика ландшафтов, их геохимические особенности, практические аспекты.	1						Тестовое задание
2.6	Тема 2.6. Геохимия азональных ландшафтов. Верховые болота. Ландшафты пойм и дельт. Вулканические ландшафты. Ландшафты солончаков и солонцов. Общая геохимическая характеристика. Геохимические способы оптимизации, практические аспекты.	1						Тестовое задание
2.7	Тема 2.7. Геохимия ландшафтов Мирового океана. Химический состав вод океана. Биологическая структура океана. Химический состав живых организмов. Геохимия донных осадков. Систематика ландшафтов. Техногенез и продуктивность ресурсов океана.	2						Тестовое задание
3.	**Геохимия техногенных ландшафтов (20 часов)**	**10**	**8**				**2**	
3.1	Тема 3.1. Геохимия агроландшафтов. Закономерности миграции, концентрации и рассеяния химических элементов. Особенности водной и биогенной миграции, биологического круговорота. Регулирование и сохранение положительного баланса химических элементов. Оптимизация агроландшафтов.	1						Тестовое задание
3.2	Тема 3.2. Геохимия горнопромышленных ландшафтов. Техногенные геохимические аномалии. Геохимические способы оптимизации горнопромышленных ландшафтов. Классификация горнопромышленных ландшаф-	1						Тестовое задание

	тов.							
3.3	Тема 3.3. Геохимическая классификация городских ландшафтов. Основные таксономические единицы геохимической систематики городов. Критерии и основные таксономические единицы геохимической классификации городских ландшафтов.	2						Тестовое задание
3.4	Тема 3.4. Методика ландшафтно-геохимического анализа города. Оценка природного геохимического фона. Определение факторов техногенного воздействия на городские ландшафты. Источники техногенного воздействия на городские ландшафты. Приоритетные элементы-загрязнители городской среды.	2						Тестовое задание
3.4.1.	Практикум в среде Excel: Оценка природного геохимического фона.		4					Проверка РГР
3.5	Тема 3.5. Геохимическая трансформация природных компонентов городских ландшафтов. Показатели трансформации химического состава атмосферного воздуха, атмосферных аэрозолей. Атмосферные выпадения. Показатели общей и относительной пылевой нагрузки (Робщ. и Кр) техногенных элементов. Гидрохимическая трансформация поверхностного стока. Геохимические аномалии донных отложений. Почвенно-геохимическая съемка. Эколого-геохимическая оценка состояния почвенного покрова города. Биогеохимическая индикация состояния городской среды.	2						Тестовое задание
3.5.1.	ГИС-практикум в среде ГИС ArcGIS: Составление карты распределения химических элементов (Zn, Pb, Cu) в почвах города.		4					Проверка РГР
3.5.2.	Самостоятельная работа в среде Excel: Определение нагрузки тяжелых металлов в составе твердых атмосферных выпадений в городах Беларуси.						2	Проверка РГР
3.6	Тема 3.6. Комплексная эколого-геохимическая оценка состояния городских ландшафтов. Методика геохимической оценки экологического риска. Электронная эколого-геохимическая карта города.	1						Тестовое задание
3.7	Тема 3.7. Геохимическая оценка воздействия городов Беларуси на пригородные ландшафты в результате атмосферных выпадений, с водными потоками, с отходами производства и потребления.	1						Тестовое задание

4.2. Рекомендуемая литература

Основная

1. Ковальчик Н.В. ГИС-картографирование и геохимический анализ ландшафтов. Практикум по геохимии ландшафтов: пособие / Н. В. Ковальчик, Н. В. Жуковская. – Минск: Изд. центр БГУ, 2019 [Электронный ресурс] / Электронная библиотека БГУ. – Режим доступа: elib.bsu.by/handle/123456789/229856 – Дата доступа 25.11.2019.

Дополнительная

2. Чертко Н. К. Геохимия ландшафта / Н.К. Чертко, Н.В. Ковальчик и др. – Минск: БГУ, 2011. – 303 с.

3. Чертко Н. К. Геохимия и экология химических элементов: справ. пособие / Н. К. Чертко, Э. Н. Чертко. – Минск: Изд. центр БГУ, 2008. – 135 с.

4. Перельман А.И. Геохимия ландшафта / А.И. Перельман, Н.С. Касимов. – М.: Астрея-2000, 1999. – 404 с.

5. Хомич В.С. Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси / В.С. Хомич, С.В. Какарека, Т.И. Кухарчик. – Минск, 2004. – 246с.

6. Глазовская М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов. – М.: Изд-во МГУ, 2007. – 350 с.

7. Зинкуте, Р. Факторный анализ при выделении ассоциаций и методические разработки подсчета геохимического фона / Р. Зинкуте // Природные ресурсы. – 1999. − № 4. – С. 97−108.

8. Хомич В.С., Какарека С.В., Кухарчик Т.И., Кравчук Л.А. Светлогорск: экологический анализ города. – Минск: Минсктиппроект, 2002. – 216 с.

9. Чертко, Н. К., Карпиченко, А. А. Геохимическая структура ландшафтов Беларуси // Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 2, Химия. Биология. География. – 2011. – № 3. – С. 121–124.

10. Нацыянальны атлас Беларусі. Мн.: Белкартаграфія, 2002. – 292 с.

11. Lê, S., Josse, J. & Husson, F. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. Journal of Statistical Software. 2008. 25 (1)

4.3. Электронные ресурсы

1. Геопортал земельно-информационной системы Республики Беларусь [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gismap.by/. – Дата доступа 25.11.2019.

2. Государственный комитет по имуществу Республики Беларусь [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gki.gov.by/ru/. – Дата доступа 25.11.2019.