

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

ГЕОХИМИЯ ПРИРОДНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Учебно-методическое пособие
для вузов

Составитель
Н. А. Протасова

Издательско-полиграфический центр
Воронежского государственного университета
2008

Утверждено научно-методическим советом биолого-почвенного факультета
25 января 2008 г., протокол № 4.

Рецензент д. б. н., профессор Т. А. Девятова

Учебное пособие подготовлено на кафедре почвоведения и агрохимии биолого-почвенного факультета Воронежского государственного университета.

Рекомендовано для студентов 4 курса биолого-почвенного факультета Воронежского государственного университета.

Для специальности 020701 – Почвоведение

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. Геохимическая классификация природных ландшафтов	4
2. Абиогенные ландшафты.....	5
3. Тундровые ландшафты	7
4. Лесные ландшафты	8
5. Степные и луговые ландшафты.....	12
6. Лесостепные ландшафты	22
7. Пустынные ландшафты	28
Литература	35

Предлагаемое учебно-методическое пособие к семинарским занятиям составлено в соответствии с программой курса «Биогеохимия» с учетом почти полного отсутствия новой учебной литературы, предназначенной для студентов-почвоведов и экологов. Пособие может быть использовано при изучении геохимических особенностей основных природных ландшафтов.

1. Геохимическая классификация природных ландшафтов

Под ландшафтом понимается конкретная территория, однородная по происхождению и истории развития, обладающая единым геологическим основанием, однотипным рельефом, единообразным сочетанием почв и растительности и отличающаяся от других территорий структурой, характером взаимосвязи и взаимодействия между отдельными компонентами этой территории. По определению А. И. Перельмана, ландшафт – это сложная неравновесная система, в которой происходит взаимодействие и взаимопроникновение элементов между породой, почвой, водами, воздухом, живыми организмами.

В основе всякой классификации лежат признаки изучаемых объектов. В первую очередь необходимо установить таксономическое значение отдельных геохимических признаков ландшафта. Так как геохимические особенности ландшафтов определяются миграцией атомов, то в основу классификации следует положить особенности миграции химических элементов, а также понятие об элементарном ландшафте, введенное в науку Б. Б. Полюновым в 1926 г.

Элементарный ландшафт приурочен к определенному элементу рельефа, однородной породе, почве и одному типу растительности. Например, вершина холма с дерново-подзолистой песчаной почвой, на которой произрастает лишайниковый бор, может быть выделена как элементарный ландшафт.

Таксономическое значение химического элемента в ландшафте зависит от его содержания в среде, интенсивности миграции и способности к концентрации. Элементы с высокими кларками, энергично мигрирующие и накапливающиеся, имеют наибольшее таксономическое значение, они типоморфны. Сера, например, типоморфна в аридных ландшафтах, железо – в таежных болотах. При этом важно не валовое содержание элемента, а его подвижные соединения.

При геохимическом изучении ландшафтов необходимо различать признаки систематические и несистематические (индивидуальные). Систематические признаки – это признаки, общие для многих ландшафтов.

Классификация элементарных ландшафтов. Согласно Б. Б. Полюнову, все элементарные ландшафты суши по условиям миграции химических элементов можно объединить в три группы:

1. **Элювиальные ландшафты** располагаются на повышенных элементах рельефа, характеризуются хорошим дренажем и глубоким залеганием грунтовых вод, выносом вещества нисходящими токами влаги. М. А. Глазовская выделяет 4 подтипа элювиальных ландшафтов: собственно элювиальные, трансэлювиальные, трансэлювиально-аккумулятивные, элювиально-аккумулятивные.

2. **Супераквальные (надводные) ландшафты** – приурочены к пониженным элементам рельефа с близким залеганием грунтовых вод. Здесь наблюдается частичная аккумуляция химических элементов, привнесенных как грунтовыми водами, так и из элювиальных ландшафтов.

3. **Субаквальные (подводные) ландшафты** – образуются на дне водоемов и представляют собой зону аккумуляции веществ.

Парагенетическая ассоциация элементарных ландшафтов, которые сопряжены в пределах той или иной территории, по определению А. И. Перельмана, образуют **геохимический ландшафт**. Элементарные ландшафты связаны в геохимическом ландшафте миграционными потоками вещества.

Наиболее крупными единицами классификации элементарных ландшафтов, разработанной А. И. Перельманом, являются **ряды ландшафтов**, выделяемые по виду миграции. Это *абиогенные, биогенные и культурные ландшафты*. *Биогенным* называется такой ландшафт, в котором живое вещество, поглощая и трансформируя солнечную энергию, обуславливает важнейшие черты миграции химических элементов, определяет характер связи между атмосферой, гидросферой и литосферой.

От того, как протекает *бик* (биологический круговорот), сколько органического вещества образуется в ландшафте, каков его состав, с какой скоростью оно разлагается, зависит формирование ландшафтов. Особенности *бика* и лежат в основе геохимической классификации данного ряда ландшафтов.

По соотношению важнейших параметров *бика* – биомассы (*Б*) и ежегодной продукции (*П*) выделяются – 5 **групп** ландшафтов: лесная, степная-луговая-саванновая, тундровая, пустынная и примитивно-пустынная. Группы разделяются на **типы** по величине ежегодной продукции живого вещества и скорости разложения органических остатков, определяемой по значению коэффициента *K* ($K = \lg P / \lg B$).

Между типом и семейством выделяют самостоятельный таксон – **отдел**, который связан с особенностями *бика*. При этом учитываются континентальность климата и возраст ландшафта. В пределах отделов по величине *П* выде-

ляются три **семейства** ландшафтов по определенным сочетаниям растительности и почв: северное (с наименьшей П), среднее и южное.

Следующий таксон – **класс элементарного ландшафта** – выделяется по особенностям водной миграции и доминирующим типоморфным элементам в горизонте А почв. Классы расчленяются по особенностям механической миграции, определяемым рельефом, на **роды**. Выделяются три основных рода – **элювиальный (автономный), супераквальный и субаквальный**.

Различия в пределах родов связаны с горными породами или формациями. Поэтому выделяют большое число видов элементарных ландшафтов по условиям и особенностям миграции химических элементов.

Классификация геохимических ландшафтов. В основу классификации положен характер геохимического сопряжения между автономными и подчиненными элементарными ландшафтами. *Полное геохимическое сопряжение* (катена) включает в себя автономный, супераквальный и субаквальный ландшафты. *Неполное* не содержит одного из них. Полное геохимическое сопряжение в условиях однородного геологического строения называется *основным*. Выделяются восемь таксонов: **ряд, группа, тип, отдел, семейство, класс, род, вид**.

Среди геохимических ландшафтов число единиц одного и того же таксономического ранга значительно больше, чем среди элементарных ландшафтов. Это связано с различиями в геохимических сопряжениях: один и тот же автономный ландшафт может сопрягаться с различными автономными и подчиненными ландшафтами.

В пределах классов различия между геохимическими ландшафтами в основном определяются соотношением между автономными и подчиненными ландшафтами и интенсивностью водообмена, которая зависит от рельефа. По характеру миграции элементов выделяются три основных рода. Виды геохимических ландшафтов выделяются на основании тех же критериев, что и виды элементарных ландшафтов.

2. Абиогенные ландшафты

Природные условия некоторых районов Земли (Антарктида, Гренландия) исключают возможность *бики*. Эти ландшафты относятся к абиогенному ряду. В них наблюдается важнейшая особенность всех земных ландшафтов – взаимопроникновение атмо-, лито- и гидросферы. Главнейшими процессами являются агрегатные преобразования воды: водяной пар – жидкая вода – лед. Выделяют следующие **группы** абиогенных ландшафтов: абиогенные ландшафты с окислительной атмосферой (современные земные), абиогенные

ландшафты с восстановительной атмосферой (вымершие земные), абиогенные ландшафты без атмосферы и гидросферы (лунные). Абиогенные ландшафты Земли относятся к весьма примитивным системам.

3. Тундровые ландшафты

Тундровые ландшафты занимают крайнюю северную полосу материковой суши, контактирующую с морями арктического бассейна. На равнинах Евразии и Северной Америки они образуют самостоятельную ландшафтную зону, в горах – особый высотный пояс. Формируются они в условиях холодного климата, когда уменьшаются биомасса и ежегодная продукция живого вещества, замедляется скорость разложения остатков организмов, происходит накопление органического вещества на поверхности и в почве, возникает тундровый *бик* с участием Al, Fe, Mn. Низкие температуры воздуха и почвы лимитируют бик.

Для тундры характерны напочвенные ярусы мхов и лишайников, кустарнички и травы. Биомасса в тундре колеблется в широких пределах – от 40 до 300 ц/га, большая часть ее сосредоточена в корнях. Почвенная среда бедна элементами питания. Ежегодный прирост (П) составляет 10 ц/га для арктической тундры и 25 – для кустарничковой. У большинства растений зольность 1,5–2 %.

Многие растения содержат повышенные количества Si, Al, Fe. В золе ряда тундровых растений повышено содержание серы, при минерализации которой образуется серная кислота – важный агент миграции алюминия и других металлов. Содержание зольных элементов и азота в биомассе тундровой растительности примерно одинаково. Среди зольных элементов наибольшие концентрации свойственны Ca, K, Mg, P, Si. Разные систематические группы растений селективно поглощают тяжелые металлы.

В условиях хорошего дренажа на склонах формируются кислые бурые тундровые почвы. Для них характерна аккумуляция слаборазложившихся растительных остатков и образование торфянистого горизонта. Ниже этого горизонта профиль почв мало дифференцирован. В маломощном и плохо выраженном гумусовом горизонте содержание гумуса около 1–2,5 %, в котором преобладают фульвокислоты. Кислые почвенные растворы способствуют водной миграции металлов в виде комплексных органических соединений.

На низменных равнинах с затрудненным дренажем в нижней части почвенного профиля устойчиво существуют условия дефицита кислорода. Это способствует формированию тундрово-глеевых почв с глеевым горизонтом, простирающимся до границы вечной мерзлоты.

Биомасса растительности возрастает при переходе от лишайниково-моховой тундры к кустарничковой от 4–7 до 29 т/га сухого вещества. В переходной подзоне лесотундры она превышает 100 т/га. При этом масса подземных органов растений преобладает над надземной массой.

В тундровом типе выделяют 5 *отделов*, а в них – 3 основных *семейства*. В наиболее северных и холодных условиях развивается арктическая тундра, среднее положение занимает мохово-лишайниковая и южное – кустарничковая тундра. В пределах семейств выделяются классы, роды и виды. В равнинной тундре преобладают ландшафты кислого глеевого класса, в горной – кислого.

Особым типом тундровых ландшафтов являются **верховые болота**. На них преобладают сфагновые мхи, растут кустарнички и немногочисленные виды трав. Верховые болота не связаны с минеральным грунтом и находятся вне зоны влияния грунтовых вод. Эти болота образуются в результате зарастания озер (наиболее мощные торфяники) и заболачивания водоразделов. Источником их минерального питания служат только атмосферная пыль и осадки, что определяет минеральное голодание растений.

Разложение органических остатков в верховых болотах протекает в сильноокислой среде. Отмершие органические остатки сохраняют органоморфную структуру. В ходе оторфованья увеличивается количество углерода и уменьшается – кислорода.

При разложении органических остатков Si, Al, Fe почти не минерализуются и остаются в составе органических веществ торфа, Ca, Mg, Na, K частично поступают в болотные воды. В торфе накапливаются гумусовые вещества бурого цвета. Болотные воды – наименее минерализованные воды на Земле.

4. Лесные ландшафты

Лесные ландшафты холодного и умеренного климата образуют обширный пояс в северной части материков Северного полушария. В растительности суббореальных и бореальных лесов сосредоточена значительная часть живого вещества планеты. Микробиологическая деятельность в почвах лесов протекает весьма напряженно. Из-за длительного холодного сезона, подавляющего микробиологическую деятельность, полного разрушения растительного опада не происходит. По мере увеличения длительности холодного зимнего сезона масса неразложенных растительных остатков возрастает с юга на север от 1500 т/км² сухого органического вещества широколиственных лесов до 8500 т/км² северотаежных лесов.

Для всех типов почв лесных ландшафтов характерна аккумуляция элементов питания растений в лесной подстилке, под которой расположен горизонт их выноса. Эта группа включает в себя десятки типов ландшафтов.

Влажные тропики. Они распространены на всех материках, кроме Европы, но особенно широко – в Южной Америке и Юго-Восточной Азии. В них изобилие тепла сочетается с изобилием осадков. Миграция атомов происходит с одинаковой интенсивностью в течение круглого года. Обилие тепла и влаги определяет большую ежегодную продукцию живого вещества П, которая в 2–3 раза больше, чем в широколиственных лесах и тайге, достигая 300–500 ц/га. Ландшафты влажных тропиков приурочены к областям древней суши, где эволюция непрерывно продолжается многие миллионы лет, начиная с палеогена и даже мезозоя.

В тропических почвах разложение органических веществ протекает исключительно бурно, и в них мало накапливается гумуса. В лесах практически нет лесной подстилки. В процессе разложения растительных остатков происходит быстрый вынос K, Si, Ca и относительное накопление в мертвом органическом веществе Fe, Mn. Важнейшими водными мигрантами *бика* являются Si, Ca, в меньшей степени, K, Mg, Al, Fe, Mn, S.

Влажные тропические леса относят к *кремниевому типу химизма*. Важной особенностью бика является вымывание дождевыми водами из листьев N, P, K, Ca, Mg, Na, Cl, S. Для влажных тропиков наиболее характерны ландшафты кислого и кислого глеевого классов, но встречаются и сернокислые, кальциевые и соленосно-сульфидные ландшафты.

Кислые влажные тропики формируются на изверженных, метаморфических и осадочных силикатных породах. Почвенные воды имеют кислую реакцию и выщелачивают подвижные соединения на большую глубину. В первую очередь из почв и коры выветривания выносятся Ca, Na, Mg, K. Сравнительно быстро выщелачиваются кремнекислота силикатов, многие редкие элементы – Li, Rb, Cs, Ba, Sr. В результате почва и кора выветривания относительно обогащаются инертными элементами – Fe, Al, Zr, остаточным кварцем. Богатство почв гидроксидами Fe придает им красную, оранжевую, желтую окраску.

Во влажных тропиках существует два вида сорбционных барьеров: поглощающие анионы и поглощающие катионы. В условиях интенсивного выщелачивания единственная форма нахождения подвижных химических элементов, надежно защищающая их от выноса, – нахождение в живом веществе. В ферраллитовых, аллитных и феррисиаллитно-аллитных почвах катионогенные элементы мигрируют энергичнее анионогенных. Для заболоченных супераквальных ландшафтов влажных тропиков характерны грунтово-водные

подзолы с мощными оглееными органожелезистыми и органо-глиноземными горизонтами.

Ландшафты широколиственных лесов. Приурочены к областям влажного умеренно-теплого климата Евразии. Биомасса в широколиственных лесах немного меньше, чем во влажных тропиках (3000–5000 ц/га), но ежегодная продукция (П) и зеленая ассимилирующая масса B_2 меньше в несколько раз. В направлении на юг от северной границы бореальных лесов происходит постепенное уменьшение гумидности природных условий и сокращение холодного зимнего сезона, затрудняющего биогеохимические процессы. Соответственно изменяется флористический состав фитоценозов и геохимическая специализация растений-доминантов.

Широколиственные деревья сравнительно богаты зольными элементами, особенно листья. В золе много Са (до 20 %), меньше К и Si, еще меньше Mg, Al, Р и меньше всего Fe, Mn, Na, Cl. По мере усиления биогеохимических процессов увеличивается биомасса и опад, но уменьшается масса мертвого органического вещества. Одновременно происходят изменения в химическом составе растений и в соотношении масс химических элементов, мигрирующих в системе биологического круговорота.

В лесных почвах преобладают процессы выщелачивания, и автономный ландшафт с вертикальным и боковым стоком теряет подвижные элементы. Высокое содержание в растениях Са и его энергичное биологическое поглощение определяют кальциевый химизм *бика* в широколиственных лесах. Са – типоморфный элемент, менее велико значение Н.

В ландшафтах Н – Са-класса верхние горизонты бурых и серых лесных почв выщелочены от карбонатов. Кора выветривания менее мощная и менее выщелоченная, чем во влажных тропиках. В ландшафтах Са-класса, где коры выветривания и континентальные отложения содержат карбонаты, в формировании химического состава вод, помимо *бика*, важная роль принадлежит процессам растворения карбонатов.

В отличие от влажных тропиков *бик* в широколиственных лесах улучшает условия существования организмов. Для широколиственных лесов характерно совершенное геохимическое сопряжение между автономными и подчиненными ландшафтами. Тип широколиственных лесов включает ряд отделов, своеобразие которых определяется климатом, историей развития, возрастом.

Таежные ландшафты. Этот наиболее распространенный тип ландшафтов образует единую таежную зону от западных до восточных границ в России и Канаде. Биомасса в тайге не намного уступает влажным тропикам и широколиственным лесам. В южной тайге Б превышает 3000 ц/га и только в

северной понижается до 500–1000 ц/га. Более половины биомассы представлено древесиной, состоящей из клетчатки (около 50 %), лигнина (20–30 %), гемицеллюлозы (более 10 %), в меньшей степени из смол и дубильных веществ.

Ежегодная продукция в южной тайге почти такая же, как в широколиственных лесах, в северной тайге – вдвое меньше. Растительный опад в южной тайге меньше, чем в дубравах, еще меньше он в северной тайге. Для тайги характерна низкая зольность прироста: в северной тайге ниже 1,5 %, в средней и южной – 1,6–2,5 %. Хвоя, содержащая много SiO_2 , играет ведущую роль в опаде деревьев. Для тайги характерен *азотный тип химизма бика* ($\text{N} > \text{Ca}$), в то время как в широколиственных лесах – кальциевый ($\text{Ca} > \text{N}$).

В холодной тайге разложение органических веществ протекает медленнее, чем в широколиственных лесах. Поэтому в тайге накапливается много лесной подстилки. В почвах процессы минерализации и гумификации ослаблены, и энергично идет образование фульвокислот. Запасы гумуса в дерново-подзолистых почвах южной тайги почти вдвое меньше, чем в широколиственных лесах. В условиях кислого выщелачивания на бескарбонатных породах формируются ландшафты кислого и кислого глеевого классов.

Южная тайга кислого класса формируется на силикатных бескарбонатных породах в условиях хорошего дренажа, исключающего заболачивание автономных ландшафтов. *Бик* обуславливает энергичное кислое выщелачивание и слабое биологическое поглощение. В результате автономный ландшафт в целом обедняется подвижными элементами, биологический круговорот не замкнут.

В дерново-подзолистых почвах имеет место *щелочно-кислотная и окислительно-восстановительная зональность*. В профиле дерново-подзолистых почв отмечается существование двух основных геохимических барьеров: верхнего биогеохимического и сорбционного (гумусовый горизонт), на котором аккумулируются N, C, H, Ca, P, часто Zn, Ni, Cu, Co; нижнего совмещенного – щелочного, сорбционного и, возможно, кислородного (Fe, Al, Mn, Cu, V, Ni, Co, Zn, Cr).

Промытость почв и коры выветривания в тайге определяет низкую минерализацию грунтовых вод. Дерново-подзолистые почвы бедны элементами питания растений. Многие из них находятся в слабоподвижной форме.

В понижениях, где грунтовые воды залегают близко к поверхности, образуются низинные болота с зелеными мхами, осоками и «кислыми злаками». Круговорот химических элементов в болотных ландшафтах замедлен, так как эти элементы активно поглощаются растениями. Краевые зоны болот являются глеевыми и сорбционными геохимическими барьерами, на которых задер-

живаются многие элементы, выщелоченные из почв и коры выветривания водоразделов. Для сопряженных ландшафтов болот, кроме H^+ , типоморфно Fe.

В зависимости от степени континентальности климата, истории геологического развития и проявления многолетней мерзлоты таежный тип может быть разделен на несколько отделов:

1. приокеаническая (атлантическая) тайга;
2. умеренно континентальная тайга;
3. континентальная сибирская тайга (без многолетней мерзлоты);
4. континентальная и резко континентальная сибирская мерзлотная тайга;
5. приокеаническая (тихоокеанская) мерзлотная тайга;
6. приокеаническая (тихоокеанская) тайга без мерзлоты.

В каждом отделе выделяются три основных семейства – северной, средней и южной тайги, различающиеся по величине П. Во всех семействах преобладают кислые и кислые глеевые классы ландшафтов.

5. Степные и луговые ландшафты

Степные ландшафты. Биомасса в степях на порядок меньше, чем в лесных ландшафтах: от 100 до 400 ц/га, причем в отличие от лесов большая ее часть сосредоточена в корнях (70–90 %). Ежегодная продукция (П) составляет 13–50 ц/га. В целинных степях практически вся продукция поступает в почву и используется для накопления запасов мертвого органического вещества. Содержание золы в степных растениях выше, чем в лесных, и нередко достигает 10 %. Целинные степи обладают наиболее закрытым круговоротом среди всех типов наземных ландшафтов.

По макроэлементному составу золы Родин и Базилевич делят степные травы 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. Ca, Si, Fe, Al преимущественно накапливаются в корнях, а Na, K – в надземных органах.

Характерная особенность *бики* степей – скорость. В степных ландшафтах ежегодно в бик вовлекается значительно больше водных мигрантов, чем в тайге. В опаде большую роль играют основания, полностью нейтрализующие органические кислоты. Это определяет насыщенность поглощающего комплекса кальцием и магнием, нейтральную и слабощелочную реакцию почв.

Выделяются два основных процесса разложения органических веществ в степях: *кальциевое разложение* – Ca преобладает над Na в поглощающем комплексе почв; *кальциево-натриевое разложение* – наряду с Ca и Mg в по-

глошающий комплекс входит Na, обуславливая солонцеватость автоморфных почв.

В отличие от лесных ландшафтов почвы степей в 2–5 раз богаче органическим веществом. Бактериальный состав микрофлоры, нейтральная среда, богатство растительного опада кальцием, периодическое иссушение приводят к преобладанию гуминовых кислот над фульвокислотами.

В сухих степях фитомасса уменьшается до 100–200 ц/га, запасы гумуса составляют 100–200 т/га, а его содержание уменьшается до 3,0–4,5 %. В гумусе увеличивается доля фульвокислот. Нейтральная и слабощелочная среда, слабая растворимость гуминовых кислот и отсутствие свободных агрессивных фульвокислот, обилие органических коллоидов и высокая емкость поглощения черноземных почв, непромывной водный режим определяют низкую интенсивность миграции многих химических элементов.

Микроэлементный состав флоры черноземных и сухих степей сходен и определяется в основном систематической филогенетической биогеохимической специализацией видов, родов и семейств.

В автономных ландшафтах бореальных степей формируются черноземные и каштановые почвы (семейство кальций-гумусовых степных почв). Биогенная аккумуляция химических элементов в них, как правило, сильнее, чем в лесах, а выщелачивание слабее, что объясняется щелочной средой, менее благоприятной для миграции большинства металлов, а также слабым промачиванием в условиях сухого климата.

Характерная особенность степных почв – накопление гумуса, количество которого постепенно убывает с глубиной. В верхней части горизонта А в связи с энергичным разложением органических остатков почвенный воздух содержит много CO_2 , а в растворе устойчива система $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$. В нижней части гумусового горизонта CO_2 меньше, и там на геохимическом барьере из раствора осаждается CaCO_3 , образуя иллювиальный карбонатный горизонт.

От интенсивности бика, мощности гумусового горизонта зависит и глубина залегания карбонатного горизонта. В зависимости от климатических условий и характера материнской породы карбонаты залегают на разной глубине и в различных формах. Это обеспечивает гидрокарбонатно-кальциевый состав почвенных растворов. Са занимает господствующее положение в поглощающем комплексе.

Для черноземных и каштановых почв характерны два основных радиальных геохимических барьера:

1. биогеохимический в верхней части гумусового горизонта, где за счет биогенной аккумуляции накапливаются P, S, K, Ca, местами Mg, Na, Sr, Mn, Ba, Cu, Zn, Co, Pb, Mo, As и др.;

2. щелочной и термодинамический барьеры в нижней части гумусового горизонта и в верхней части карбонатного, где накапливается CaCO_3 .

В элювиальных почвах преобладают окислительные условия, на что указывает неподвижность железа и отсутствие оглеения. В черноземах в связи с их лучшим увлажнением периодически создается слабоокислительная среда с подвижным Mn и на короткий срок – слабовосстановительная. Возможно, этим объясняется формирование гумуса черного цвета и местами передвижение Mn. В каштановых почвах среда более окислительная, чем в черноземах, и поэтому, предположительно, гумус в них коричневый, а Mn менее подвижен.

Черноземные степи. Этот тип включает три основных отдела:

Умеренно континентальные степи (европейские);

континентальные степи (западносибирские);

резко континентальные степи (восточносибирские).

В каждом отделе имеется 3 семейства – северные (луговые), средние (настоящие) и южные (засушливые) степи. В зависимости от зонально-провинциальных особенностей и характера катенарной дифференциации в семействах формируются ландшафты кальциевого, кальциево-глеевого, кальциево-натриевого и других классов. Для черноземных степей характерны все три рода геохимических ландшафтов.

Рассмотрим геохимические особенности распределения микроэлементов в почвенном профиле черноземов Центрального Черноземья.

При непромывном типе водного режима процессы выщелачивания микроэлементов ослабляются, а их биогенная аккумуляция вследствие более интенсивного гумусообразования и гумусонакопления под влиянием травянистой растительности усиливается. Качественный микроэлементный состав почвообразующих пород региона и сформированных на них черноземов почти одинаков, кроме Mn, который интенсивно накапливается в процессе почвообразования.

Почвообразующие породы:

$\text{Ti} > \text{Ba} > \text{Mn} > \text{Zr} > \text{Sr} > \text{Cr}, \text{V} > \text{Zn} > \text{B} > \text{Ni} > \text{Ga} > \text{Cu} > \text{Co} > \text{I}, \text{Mo} > \text{Be}$

Черноземы:

$\text{Ti} > \text{Mn} > \text{Ba} > \text{Zr} > \text{Sr} > \text{V} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{B} > \text{Ni} > \text{Ga} > \text{Cu} > \text{Co} > \text{I} > \text{Mo} > \text{Be}$

Уровень содержания большинства микроэлементов в черноземах региона примерно такой же, как в почвообразующих породах. В результате черноземообразования происходит перераспределение многих микроэлементов в

почвенной толще и формирование количественного микроэлементного состава, отражающего генетические особенности каждого почвенного подтипа.

В процессе почвообразования во всех черноземах и лугово-черноземных почвах региона относительно почвообразующих пород наблюдаются явное накопление Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Be, B, I, Mo, а также макроэлементов – S, P, и – интенсивный вынос Sr и его осаждение в карбонатных горизонтах. Однако, степень аккумуляции микроэлементов в гумусовом горизонте различных подтипов черноземов неодинакова (табл. 1).

Для оподзоленных черноземов характерно совмещение процесса интенсивного гумусонакопления и слабой элювиально-иллювиальной дифференциации почвенного профиля. Вследствие этого происходят вынос из гумусового горизонта Cr, V, Ni, Sr, B, их накопление в иллювиальном горизонте и биогенная аккумуляция Mn, Cu, Zr, I, Mo и подвижных соединений Mn, Zn, Cu, Co, B, I, Mo. Верхняя часть профиля оподзоленных черноземов обеднена монтмориллонитом и оксидами Fe и Al, относительно обогащена каолинитом, и гумусовый горизонт имеет признаки элювиирования.

Таблица 1

Коэффициенты аккумуляции микроэлементов в черноземах Центрального Черноземья (данные Н. А. Протасовой и А. П. Щербакова, 2003)

Cr	V	Ni	Mn	Zn	Cu	Co	Ti	Zr	Be	Ba	Sr	B	I	Mo
Черноземы оподзоленные														
0.8	0.9	0.8	1.3	1	1.4	1	1	1.2	1	0.9	0.7	1.1	4	1.1
Черноземы выщелоченные														
0.9	0.9	1.1	1.4	1.2	1.3	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	0.8	1.1	2.2	1.1
Черноземы типичные														
0.8	1.1	1.3	1.5	1.2	1.6	1.2	1.3	1.3	1.1	1.1	0.9	1.3	3	1.2
Черноземы обыкновенные														
1	1.1	1.3	1.8	1.2	1.4	1.3	1.2	1.4	1.2	1	0.4	1.2	2	1.4
Черноземы южные														
1.1	1	1.3	1.2	1.4	1.4	1.4	1.5	1.2	1.8	1.3	0.4	1.1	2	1.9
1.1	1	1.2	1.4	1.1	1.5	1.2	1.1	1	1.1	1.1	0.8	1.1	5	1.4

В результате процессов элювиирования и лессиважа отмечается некоторое накопление ила в бескарбонатной прослойке, вследствие чего и происходит перераспределение ряда микроэлементов в почвенной толще. Многие ис-

следователи отмечают неравномерность распределения илистых частиц, обусловленную различной интенсивностью процессов внутрипочвенного выветривания (оглинивания) в профиле черноземов.

Так как выщелоченные и оподзоленные черноземы региона сформировались на однородных в генетическом отношении породах и в одинаковых условиях увлажнения, их микроэлементный режим имеет заметное сходство. Выщелоченные черноземы характеризуются сравнительно однородным химическим составом илистой фракции во всех горизонтах, хотя содержание глинистых минералов в гор. А меньше, чем в гор. В и С из-за выноса ила.

В профиле выщелоченных черноземов улавливаются черты элювиально-иллювиальной дифференциации в содержании Cr, V, Sr, связанной с небольшим накоплением ила и полуторных оксидов Fe и Al в иллювиальном горизонте за счет лессиважа и оглинивания. В гумусовом горизонте аккумулируются Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Be, I, Mo и подвижные соединения Mn, Zn, Cu, Co, B, I, Mo.

Формирование микроэлементного состава типичных черноземов связано с однородностью гранулометрического состава по их профилю, вследствие чего микроэлементный состав меняется мало, так же, как и валовой химический состав. Отсутствие дифференциации макроэлементов по горизонтам свидетельствует о том, что сколько-нибудь значительного разрушения минеральной части под влиянием почвообразования не происходит.

Основными процессами, нарушающими равномерность распределения макро- и микроэлементов в профиле типичных черноземов, являются интенсивное гумусонакопление, миграция карбонатов и их аккумуляция в нижней части профиля.

В результате интенсивного гумусонакопления в гор. А типичных черноземов энергично аккумулируются I, Mn, Ti, Cu, Ni, Mo, их подвижные соединения и макроэлементы S, P; в меньшей степени – все остальные микроэлементы, кроме Cr и Sr, накапливающихся в карбонатных горизонтах, в которых обнаруживается кальцит в составе песчаной фракции.

Микроэлементный состав черноземов обыкновенных и южных также формируется под влиянием процессов гумусонакопления, миграции карбонатов и их аккумуляции.

Поскольку почвообразование в степной зоне протекает в условиях более сухого климата, в отсутствие сквозного промачивания и выноса ила за пределы почвенного профиля, в обыкновенных и южных черноземах происходит более заметное накопление в гумусовом горизонте Mn, Ni, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Be, B, I, Mo, подвижных соединений B, Co и в карбонатных горизонтах – Sr. Этому способствует и более высокий уровень залегания карбонатов в почвен-

ном профиле, который влияет на степень обеспеченности черноземов подвижными соединениями микроэлементов.

Формирование микроэлементного состава лугово-черноземных почв региона протекает при участии тех же самых почвенных процессов, поэтому характер распределения микроэлементов в этих почвах такой же, как и в черноземах, за исключением I, Sr, Ga и подвижного Mo. Лугово-черноземные почвы обогащаются этими микроэлементами в результате их гидрогенной миграции. Основную же роль в формировании микроэлементного состава полугидроморфных почв играют процессы образования и накопления гумуса, миграции карбонатов и их аккумуляции.

Европейские луговые степи. Относятся к лесостепной зоне. Целинные степи сохранились только в заповедниках, местность почти полностью распашана.

Ландшафты **луговых степей кальциевого класса** отличаются наибольшими Б и П. Бик поставляет в почву много органических веществ, и оснований не хватает для их нейтрализации. В результате в верхней части почвы развивается слабокислая среда, в поглощающем комплексе появляется небольшое количество H^+ . Для таких степей характерны выщелоченные и типичные черноземы с высоким содержанием гумуса и большими его запасами.

Супераквальные ландшафты, питающиеся гидрокарбонатно-кальциевыми водами, представлены лугами и болотами в долинах рек. При этом, $CaCO_3$, накапливается в почвах в форме лугового или болотного мергеля. Реакция почв нейтральная или слабощелочная, в них энергично разлагаются органические остатки, накапливается много гумуса (на лугах) или хорошо разложившегося торфа (на болотах), развивается карбонатное оглеение.

В Европейской России распространены все 3 рода ландшафтов, но наиболее характерен второй – лугово-степные эрозионные возвышенности.

Кальциево-натриевые луговые степи. Формирование ландшафтов данного класса связано с развитием засоления и рассоления. Они характерны для Окско-Донской равнины, где солонцеватые черноземы чередуются с солонцами, содовыми солончаками, лугами и болотами.

Кальциево-магниевые луговые степи. Формируются на гипербазитах, доломитах и других породах, богатых магнием, при участии гидрокарбонатно-магниевых вод. В бике главное участие принимает кальций.

Средние и южные черноземные степи. В систематическом отношении они аналогичны луговым степям: здесь также имеются ландшафты кальциевого, кальциево-натриевого, кальциево-магнезиевого классов, все три рода и большое число видов.

Черноземные степи III рода. Наиболее совершенное геохимическое сопряжение элементарных ландшафтов характерно для данного рода. Это преимущественно степные низкогорья и мелкосопочки, а также участки с резким овражным рельефом на равнинах, где происходит энергичный водообмен. Отличаясь по некоторым ландшафтно-образующим факторам (климату, геологическому строению, рельефу, почвенно-растительному покрову), все они обладают рядом общих биогеохимических свойств. Эти свойства определяются близостью условий миграции химических элементов. В зависимости от геологического строения имеется большое число видов ландшафтов.

В *автономных и трансэлювиальных позициях* формируются маломощные щебнистые черноземы и черноземовидные почвы. Для них характерны нейтральная и слабощелочная реакция, фульватный состав гумуса, контрастное распределение илистой фракции в профиле с резким максимумом в гумусовом горизонте, бескарбонатность верхней части почвы. В таких почвах концентрируются преимущественно анионогенные элементы и комплексообразователи.

В *подчиненных позициях* – долинах рек – обычно формируются элементарные ландшафты гидрокарбонатно-кальциевого-глеевого или гидрокарбонатно-натриевого-глеевого классов с лугово-черноземными почвами и солодками под луговыми сообществами и осиново-березовыми колками.

Основным механизмом селективной дифференциации анионогенных элементов и комплексообразователей является их мобилизация в щелочной среде почв автономных ландшафтов, миграция и осаждение на глеевых, кислых и сорбционных геохимических барьерах в почвах подчиненных ландшафтов долин небольших рек.

Черноземные степи II и I родов представлены *ландшафтами эрозионных возвышенностей и аккумулятивных низменностей*. В связи с широким распространением покровных рыхлых отложений их геохимическая контрастность значительно меньше, чем в низкогорьях. Пространственная структура ландшафтов II и I родов сравнительно однородна. В автономных условиях (верхняя часть склона) на лессовидных карбонатных суглинках развиты зональные разнотравные ковыльные степи на типичных, обыкновенных и южных черноземах.

В нижних частях склонов и депрессиях рельефа (элювиально-аккумулятивные ландшафты) обычно формируются ковыльно-типчаково-полынные сообщества на карбонатных и солонцеватых черноземах, иногда солонцах. В западинах и балках с близким уровнем грунтовых вод или верховодки (супераквальные и супераквально-аккумулятивные ландшафты) разви-

ты осиново-березовые колки и заболоченные луга на лугово-черноземных осолоделых, торфянисто-глеевых почвах и солодах.

Автономные ландшафты кальциевого класса. Черноземы на рыхлых отложениях разного минералогического и химического состава отличаются главным образом уровнями содержания микроэлементов, но сходны по характеру распределения их в почвенном профиле.

Полноразвитые черноземы на покровных отложениях характеризуются неконтрастной радиальной дифференциацией микроэлементов. Это связано со слабой изменчивостью минералогического и гранулометрического состава по профилю и отсутствием контрастных геохимических барьеров. В иллювиальном карбонатном горизонте образуются слабые аномалии подвижных форм тяжелых металлов, осаждающихся на щелочном геохимическом барьере. Некоторое увеличение содержания подвижных соединений микроэлементов в карбонатном горизонте может быть связано и с утяжелением гранулометрического состава по сравнению с выше- и нижележащими горизонтами (сорбционный барьер).

Сухие степи. Тип сухих степей является переходным между черноземными степями и пустынями. В растительном покрове сухих степей преобладают полынно-злаковые ассоциации. Между черноземными и сухими степями переходы постепенные, и сухие степи на темно-каштановых почвах весьма близки к южным черноземным степям. Между пустынями и сухими степями также имеется много общего.

На территории России распространены 2 отдела сухих степей – *континентальные* (европейско-западносибирско-казахстанские) и *резкоконтинентальные* сухие степи (средне- и восточносибирские) с длительным промерзанием почв, а местами и с островной многолетней мерзлотой. В каждом отделе выделяется 2 семейства: северное на темно-каштановых почвах с более интенсивным *биком* и южное – на светло-каштановых почвах.

Для сухих степей типична комплексность почвенно-растительного покрова. Наиболее часто встречается сочетание каштановых почв с солонцами. Помимо типичных солонцев широко развиты солонцеватые почвы. Особенно велика комплексность на плоских недренированных равнинах (I род).

Северные европейские и казахстанские сухие степи. Среди них преобладают ландшафты Са и Са-На-классов. Геохимически контрастными являются сухостепные ландшафты III и II родов. Ландшафты III рода в складчатых областях представлены сухостепным мелкосопочником или низкогорьем. Выделяется несколько видов – на гранитоидах, сланцах, известняках и других породах. Распространены на участках, где активно проявились неотектонические поднятия, и смыв явно преобладает над аккумуляцией.

На покатых склонах преобладают маломощные щебнисто-мелкоземистые почвы. Для более пологих склонов с полынно-злаковой растительностью характерны каштановые, часто солонцеватые почвы с более развитым профилем. В *бике* и почвенных процессах значительна роль Na. К зонам разломов приурочены и солончаки. Среди ландшафтов II рода в геохимическом отношении резко различаются ландшафты складчатых и платформенных областей.

Для складчатых областей характерны пенеппены, сложенные изверженными и метаморфическими породами. Типичное геохимическое сопряжение: автономный ландшафт плоских водоразделов – сухостепной пенеппен с маломощными четвертичными отложениями; подчиненные ландшафты котловин и древних долин – сухие степи и солонцы на континентальных отложениях.

Малоподвижные анионогенные микроэлементы накапливаются в элювиальных и трансэлювиальных ландшафтах на солонцах и каштановых солонцеватых почвах. В неоген-четвертичное время кислая выщелоченная древняя кора выветривания местами подверглась засолению, которое позднее сменилось рассолением, чем и объясняется широкое распространение солонцов. Понижения рельефа в таких ландшафтах представляют собой древние долины, выполненные континентальными отложениями с ландшафтом сухой каштановой солонцеватой степи или типичными солонцами.

Ландшафты I рода развиты в равнинных областях, сложенных мощной толщей осадочных пород (Прикаспийская и Причерноморская низменности). В этих ландшафтах в миграцию вовлечены морские соли осадочных пород, поэтому здесь особенно много солончаков, солонцов, соленых озер. Темно-каштановые почвы солонцеваты.

Южные сухие степи. Отличаются более сухим климатом, меньшей интенсивностью бика, меньшим накоплением гумуса, более слабым стоком, широким развитием светло-каштановых почв. Эта подзона характеризуется наибольшим развитием солонцового процесса. Здесь много типичных солонцов, почти все светло-каштановые почвы солонцеваты. Систематика южного семейства аналогична северному, однако Са-класс здесь менее распространен.

В подчиненных, лучше увлажненных позициях степной зоны повсеместно, но локально распространены лугово-болотные и лесные ландшафты. Занимая подчиненное положение в катенах, они служат конечными резервуарами для мигрирующих из автономных ландшафтов веществ, которые осаждаются здесь на многочисленных геохимических барьерах.

Осиново-березовые рощи характерны для заболоченных западин Окско-Донской равнины («осиновые кусты») и юга Западной Сибири («березовые колки»). Геохимия этих ландшафтов существенно отличается от степных

ландшафтов водораздельных пространств. В них формируется своеобразная радиальная геохимическая структура, иной тип биологического круговорота и биогеохимической специализации растений.

Миграция элементов в системе «автономный степной ландшафт – подчиненный лесо-лугово-болотный ландшафт» определяется главным образом содовым составом атмосферных осадков и вод склонового стока, способствующих образованию в щелочной среде растворимых комплексных соединений анионогенных элементов и элементов-гидролизатов.

Автономные кальциевые ландшафты с черноземами или каштановыми почвами на различных почвообразующих породах представляют собой арену первоначальной мобилизации как анионогенных элементов и комплексообразователей, так и катионогенных микроэлементов в результате степного почвообразования и селективного биогенного поглощения. Большинство катионогенных элементов слабо подвижны в щелочной среде черноземов и каштановых почв и практически не перераспределяются в степных катенах.

Элювиально-аккумулятивные кальцево-натриевые и солонцовые ландшафты степных равнин, возвышенностей и мелкосопочника с солонцеватыми черноземами и каштановыми почвами в комплексе со степными солонцами под злаково-полынными сообществами представляют собой зону дальнейшей мобилизации «содового» комплекса элементов. Щелочная и сильнощелочная среда этих почв благоприятствует образованию растворимых комплексных соединений гидролизатов и повышает доступность растениям этих, в целом слабоподвижных, элементов. Биогенная мобилизация этих элементов играет существенную роль в их дальнейшей латеральной миграции.

Поступая в *подчиненные супераквальные ландшафты колючих западин и логов* с поверхностным и внутрипочвенным стоком, анионогенные элементы и комплексообразователи встречают на пути миграции кислые, кислые глеевые, бескарбонатные глеевые обстановки с целой системой геохимических барьеров, на которых часто происходит образование довольно контрастных безрудных ландшафтных аномалий элементов этого парагенезиса. Наибольшую роль в их образовании играют кислые, глеевые, сорбционные и двусторонние кислотно-щелочные барьеры.

Основные черты геохимии лесо-лугово-болотных ландшафтов определяются различиями поведения трех парагенетических ассоциаций микроэлементов, концентрирующихся в почвах и растениях: комплексообразователей (элементов-гидролизатов) с постоянной валентностью, элементов с переменной валентностью и катионогенных элементов.

Субтропические степи. Распространены на лессовых равнинах в предгорьях Средней Азии. Главная особенность бика – его напряженность и ско-

рость (март – апрель). Ежегодная продукция близка к биомассе. Ежегодно в бик вовлекаются большие массы водных мигрантов (больше, чем в тайге). Весной интенсивно минерализуются растительные остатки, и в почве почти не накапливается гумус (1–3 %). Светлая окраска сероземов связана не только с низким содержанием гумуса, но и с фульватным его составом.

Для субтропических степей характерно резкое преобладание окислительных условий в почвах, окислительно-восстановительная зональность в них ближе к пустыням, чем к черноземным степям. Промачивание почв сравнительно невелико, преобладает возвратно-нисходящий режим влаги, многие подвижные продукты выветривания не выносятся. Обызвесткование имеет атмогенно-биогенный характер. Однако слабое выщелачивание CaCO_3 имеет место, и в почве образуется иллювиальный горизонт (при карбонатности профиля с поверхности).

Для субтропических степей особенно характерны ландшафты Са-класса. При близком залегании к поверхности высокоминерализованные грунтовые воды засоляют почвы.

Субтропические степи Средней Азии включают три семейства: 1) *с наименее интенсивным биком* – на светлых сероземах, самые засушливые (пустынные субтропические степи); 2) *со средним биком* – на типичных сероземах (типичные); 3) *с биком максимальной интенсивности* (крупнотравные субтропические степи на темных сероземах и коричневых почвах).

Высокое содержание карбонатов в сероземах, низкое содержание гумуса, непромывной окислительный режим, малая содовость почв, слабая выраженность геохимических барьеров определяют монотонное распределение микроэлементов в вертикальном профиле почв и почвенно-геохимических катенах.

6. Лесостепные ландшафты

К лесостепной группе ландшафтов относятся геохимические ландшафты, включающие и леса, и степи в автономных позициях. Часто они составляют единые катены, но возможны и самостоятельные лесные и степные катены, например, в условиях горного рельефа. Лесостепные ландшафты формируются в климатических условиях, переходных от влажных (лесных) к сухим (степным). В отличие от степей автономные почвы лесостепных ландшафтов имеют промывной или периодически промывной режим, обеспечивающий контрастную радиальную миграцию химических элементов.

В северной Евразии лесостепные ландшафты условно относят к одному типу, в котором выделяется 5 отделов. Эти единицы систематики названы по

географическим районам их преимущественного распространения. В каждом отделе выделяется несколько семейств, а в их пределах – все 3 рода и ряд видов.

Европейская лесостепь. Для ландшафтов этого отдела характерно сочетание широколиственных лесов и луговых степей. В результате хозяйственной деятельности большинство лесов сведено, и только почвенный покров (серые лесные почвы) позволяет судить о более широком распространении лесов в прошлом. В геохимическом отношении эти ландшафты несут в себе черты как широколиственных лесов, так и луговых степей. Однако современная миграция химических элементов ближе к луговым степям.

В процессе почвообразования уровень содержания большинства микроэлементов в серых лесных почвах Центрального Черноземья по сравнению с почвообразующими породами почти не изменяется, за исключением Mn и I. Под влиянием гумусообразования и гумусонакопления происходит биогенная аккумуляция этих микроэлементов, и микроэлементный состав серых лесных почв приобретает несколько другой вид:

Ti>Mn>Ba>Zr>Sr>V>Cr>Zn>B>Ni>Ga>Cu>Co>I>Mo>Be.

В зависимости от того, какие из элементарных почвенных процессов имеют перевес, формируется тот или иной количественный микроэлементный состав серых лесных почв. Так, в условиях усиления биогенной аккумуляции, сопровождаемой накоплением гумуса фульватно-гуматного типа, развития оглинивания в иллювиальном горизонте и ослабления процессов лессиважа, который протекает с частичным разрушением ила, и ограничения миграции металлоорганических соединений формируется микроэлементный профиль темно-серых лесных почв со слабо дифференцированным по генетическим горизонтам микроэлементным составом.

Для этих почв характерен не ярко выраженный элювиально-иллювиальный тип распределения B, I, Mo, биогенная аккумуляция в гор. А валовых Mn, V, Zn, Cu, Ti, B, I и подвижных соединений Mn, Co, Cu, Zn, B, Mo. До 48 % Cu связано с минеральной частью темно-серых лесных почв, 17 % – с гуминовыми кислотами и 37 % – с фульвокислотами. Усиление процессов лессиважа сопровождаются вымыванием высокодисперсных частиц из верхней части профиля и осаждением их в иллювиальном горизонте. В илистой фракции интенсивно концентрируются Cu, Zn и в меньшей степени Mn, Co. С глубиной их относительное накопление в иле возрастает.

На фоне возрастания миграции металлоорганических соединений и оподзоливания, а также оглинивания и ослабления гумусонакопления, при котором образуется гуматно-фульватный тип гумуса, формируется микроэлементный профиль светло-серых лесных почв с резко дифференцированным микроэлементным составом по генетическим горизонтам. В этих почвах на-

блюдаются хорошо выраженное распределение Cr, V, Ni, Zn, Cu, Co, Ti, Ba, B, I, Mo по элювиально-иллювиальному типу, биогенная аккумуляция валовых Mn, Mo, I и подвижных соединений Mn, Cu, B, Mo.

53–64 % от валового содержания Cu и Zn находится в минеральной части этих почв, 8–14 % – в гуминовых кислотах и 24–38 % – в фульвокислотах. Mn не распределяется по элювиально-иллювиальному типу, так как слабо связан с глинистой фракцией. Кроме того, в оподзоленных горизонтах образуются Mn-новообразования, которые компенсируют убыль микроэлемента в результате элювирования.

Интенсивность основных почвенных процессов, определяющих формирование микроэлементного состава серых лесных почв региона, изменяется на подтиповом уровне. В подтипе серых лесных почв оподзоливание выражено слабо, поэтому только Cr, V, Zn, Cu, Co, Ti, I, Mo распределяются по элювиально-иллювиальному типу, и в биогенной аккумуляции участвуют валовые Mn, Zn, Cu, Ba, B, I, Mo и подвижные соединения Mn, Co, B, Mo. Накопление Cu в иллювиальном горизонте связано с оглиниванием.

Наибольшая интенсивность биогенной аккумуляции микроэлементов наблюдается в темно-серых лесных почвах, расположенных под лесом. Это явление объясняется поступлением микроэлементов из лесной подстилки, являющейся концентратором, в частности, тяжелых металлов. В лесных подстилках содержание Mn больше в 6–12 раз, Cu – в 3–7, Co – в 2–5 и Zn до 8 раз больше по сравнению с почвообразующей породой.

Кроме того, биогенное накопление микроэлементов в серых лесных почвах связано и с тем, что почвенные беспозвоночные избирательно концентрируют Mo, Zn, в меньшей степени – Cu, Co, Ni, Sr. Величины коэффициентов аккумуляции показывают, что только Mn, Mo, I, Ti, Zr накапливаются во всех подтипах серых лесных почв региона на фоне накопления некоторых макроэлементов – P, S, Si (табл. 2).

Причем, биогенная аккумуляция несомненна только для элементов-биофилов – Mn, Mo, I, P, S. Накопление Mn в верхних горизонтах различных почв связано не с органическими, а с минеральными соединениями элемента, так как при гумификации органических остатков элемент, не связанный с ними прочно, быстро освобождается и фиксируется в форме диоксида, пополняя запасы минеральных соединений Mn в верхних горизонтах.

Действительно, в верхних горизонтах серых лесных почв региона интенсивно накапливаются именно подвижные соединения всех микроэлементов, представленные, главным образом, минеральными формами.

Микроэлементы-гидролизаты слабого биологического захвата (по Перельману) – Ti, Zr, а также Si в силу своей инертности в малой степени под-

вержены процессам выщелачивания и слабо выносятся из гумусового горизонта. Так как, некоторые растения способны переносить Ti корнями в верхнюю часть профиля и обогащать ее, можно констатировать небольшую биогенную аккумуляцию этого элемента в гумусовом горизонте серых лесных почв.

Во всех подтипах серых лесных почв идет интенсивный вынос весьма подвижного элемента Sr, который задерживается на карбонатном барьере, в роли последнего выступает карбонатная почвообразующая порода. Таким образом, степень дифференцированности содержания микроэлементов по генетическим горизонтам почвенного профиля уменьшается от светло-серых лесных почв к темно-серым лесным. В этом же направлении усиливается аккумуляция V, Ni, Zn, Cu, Ti, Ba, B в гумусовом горизонте.

Формирование микроэлементного состава серых лесных почв региона сопровождается интенсивным концентрированием в них относительно литосферы I, B, в меньшей степени – Zr, Mo и рассеянием остальных микроэлементов.

Наиболее сильное рассеяние микроэлементов, кроме Mn, Ga, проявляется в светло-серых лесных почвах, несколько меньшее – в темно-серых лесных, что обусловлено различной интенсивностью протекающих в них почвенных процессов – биогенной аккумуляции, гумусонакопления, выщелачивания, лессиважа, иллювиирования.

Таблица 2

Коэффициенты аккумуляции микроэлементов в серых лесных почвах Центрального Черноземья (данные Н. А. Протасовой, А. П. Щербакова)

Cr	V	Ni	Mn	Zn	Cu	Co	Ti	Zr	Ba	S	B	I	Mo
Светло-серые лесные почвы													
0.6	0.7	0.6	2.8	0.9	0.9	1	1.1	1.7	0.8	0.8	1	4	1.2
Серые лесные почвы													
0.8	0.8	0.8	2.5	1	1.2	0.9	1.1	1.1	1.2	0.7	1.1	2.5	1.3
Темно-серые лесные почвы													
0.9	1.1	1	2	1.3	1.4	0.9	2	1.6	1.2	0.8	1.1	2	1.3

Рассеяние большинства микроэлементов и концентрирование I, B, Zr, Mo относительно литосферы наблюдается и в почвообразующих породах региона, на которых сформировались серые лесные почвы, что свидетельствует о близости их микроэлементного состава. Содержание Ga в почвообразующих породах и серых лесных почвах региона близко к кларку литосферы.

Дальневосточная лесостепь. Этот отдел является наиболее важным представителем лесостепей Евразии. Для него характерны сочетание лесных, лугово-степных (прерий), луговых и болотных ландшафтов, равнинный рельеф, широкое развитие лугов и болот, островные леса. Климат здесь муссонный с неравномерным выпадением осадков. В современном почвенном покрове фиксируются различные стадии рассоления в форме солонцеватых и осолоделых луговых почв.

Глинистые аллювиальные отложения, на которых в основном сформировались ландшафты, являются продуктами размыва коры выветривания окружающих гор. Плоскоравнинный рельеф, обильные летние осадки и глинистый состав почв способствуют развитию оглеения в автономных ландшафтах. Преобладает бескарбонатный нейтральный глеевый класс. В этом классе выделяется *род амурских ландшафтов*, для которых характерно преобладание лугово-степных равнин (прерий) на черноземовидных оглеенных почвах.

Автономные ландшафты прошли через супераквальную стадию, в них развивался луговой солонцово-солончаковый содовый процесс. Под луговой растительностью формируются черноземовидные почвы с мощным гумусовым горизонтом и 6–8 % гумуса в его верхней части. Разложение большего количества органических остатков создает слабокислую среду, а сильное промачивание определяет значительное выщелачивание элементов из почв. Однако богатство растительных остатков Са благоприятствует нейтрализации большей части органических кислот и почти полной насыщенности поглощающего комплекса Са.

На участках сильного поверхностного оглеения сформировались луговые подбелы с белесым псевдоподзолистым горизонтом и с железо-марганцевыми конкрециями. Подчиненные ландшафты – осоково-вейниковые и разнотравно-вейниковые луга и болота с очень слабо минерализованными силикатно-гидрокарбонатными глеевыми водами. В биологический круговорот здесь вовлекается много Si, K, Ca, Fe, Mn.

Менее распространены луговые ландшафты с содовым классом водной миграции, пойменные лугово-болотные ландшафты с бескарбонатным глеевым классом водной миграции.

Западносибирско-североказахстанская лесостепь. Этот отдел является восточным продолжением европейской лесостепи. Березо-осиновые леса образуют отдельные массивы или рощи-колки, между которыми располагаются луговые степи, луга, болота, озера. Миграция и концентрация химических элементов во многом определяется тем, какие ландшафты – слабокислые лесные или кальциевые степные занимают автономные и подчиненные позиции.

Геохимические ландшафты кальциевого и переходного классов. Среди них выделяются 3 рода. *Ландшафты I рода* – это лесостепные равнины, разделяющиеся на виды, приуроченные к платформенным и геосинклинальным формациям. *Ландшафты II рода* – это холмисто-увалистая лесостепь денудационных и денудационно-аккумулятивных равнин Приуралья, Зауралья, Северного Казахстана с преобладанием колючно-степных катен.

В автономных условиях верхних частей склонов развиты разнотравно-ковыльные степи на черноземах. В элювиально-аккумулятивных ландшафтах нижних частей склонов обычны ковыльно-типчаково-полынные сообщества на солонцеватых черноземах и солонцах.

В супераккумулятивно-аккумулятивных элементарных ландшафтах западин развиты осиново-березовые колки на лугово-черноземных осолоделых почвах, луговых и колючных солодах и болота с торфянисто-глеевыми почвами. Такая структура катен определяет селективную мобилизацию анионогенных элементов и комплексообразователей, подвижных в щелочной среде в автономных и трансэлювиальных ландшафтах кальциевого, кальциево-натриевого и солонцового классов.

Радиальная дифференциация почв в катенах возрастает от автономных ландшафтов к подчиненным. Солонцы и солонцеватые черноземы отличаются более контрастной радиальной дифференциацией, чем черноземы.

Резкая дифференциация окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных условий в колючных солодах определяют контрастность распределения многих элементов в почвенном профиле. Так, Mo и V осаждаются на кислом глеевом барьере в гумусово-элювиальном и иллювиально-глеевом горизонтах. На кислом сорбционном барьере в гумусовых горизонтах концентрируются Y и Sc.

За счет биогенной аккумуляции древесными породами в гумусовых горизонтах возникают аномалии Mn и Sr. Катионогенные элементы мигрируют в щелочной среде слабо и не образуют ландшафтных аномалий за счет латеральной миграции.

Ландшафты III рода (южноуральские) представлены низкогорной березовой лесостепью Урала и Северного Казахстана. Основные черты биологического круговорота здесь определяются различиями химического состава древесных и травянистых растений. Деревья и кустарники катионофильной биогеохимической специализации, травы ближе катионофильной специализации степей.

В низкогорных и мелкосопочных массивах в зависимости от экспозиции склонов и литологии коренных пород развиты три основных типа катен с различной радиальной и латеральной геохимической структурой, типами и ви-

дами геохимических барьеров. Выделяют 4 типа катен: горно-лесной, лесостепной, степной мелкопочвенный, колодно-долинный; колодно-западинный.

Якутская мерзлотная лесостепь. Ландшафты этого отдела распространены на равнинах по средней Лене и ее притокам. Климат засушливый, и растения пополняют недостаток атмосферных осадков за счет влаги деятельного слоя сплошной многолетней мерзлоты, которая определяет существование лесных и луговых ландшафтов. На плоских водоразделах развита сухая лиственничная тайга на палевых мерзлотно-таежных и мерзлотно-таежных палевых осолоделых почвах с нейтральной реакцией (Са-класс).

Кроме тайги развиты также луга, луговые и полынно-злаковые степи, болота. Для значительной части территории характерен содовый класс водной миграции. Распространены содовые солонцы и солончаки, соленые озера. В Центральной Якутии преобладает надмерзлотный континентальный тип соленакпления. Широко развит термокарст, приводящий к образованию на днищах озер особых луговых ландшафтов – аласов.

Забайкальско-монгольская лесостепь. Резко континентальный климат, островная многолетняя мерзлота, расчлененный рельеф определили в этом отделе распространение хвойных лесов в сочетании со степями и остепненными лугами. Велика роль высотной поясности и экспозиции. Это в основном горная лесостепь с лиственничными травяными лесами на черноземовидных (темноцветных дерновых) почвах. С этими ландшафтами сопряжены остепненные луга на выщелоченных и типичных черноземах.

В лесостепных катенах наблюдается мобилизация катионогенных элементов в слабокислых почвах автономных и транзитных ландшафтов. Для лесных и степных ландшафтов характерна высокая почвенно-геохимическая контрастность.

7. Пустынные ландшафты

Для всех пустынь характерно малое количество осадков. Пустыня – это ландшафт с малой биологической информацией, ослабленными биотическими и водными связями, но с интенсивными прямыми воздушными связями. Для пустынь характерны саксауловые леса, травянистые, кустарниковые и полукустарниковые сообщества. Это позволяет рассматривать различные пустыни как результат уменьшения Б и П (деградации) лесов, степей, лугов и саванн. Пустынная деградация связана не только с иссушением климата, но и с похолоданием (полярные пустыни) и засолением (солонцы и солончаки в степях).

Биомасса в пустынях обычно составляет 10–15 ц/га, но достигает и 300 ц/га. Для пустынной флоры характерна интенсивная биогенная аккумуляция Na, Cl, S, K, P. Щелочные и щелочно-земельные металлы вовлекаются в бик интенсивнее, чем в степях. В резкоокислительной среде пустынь разложение их остатков протекает интенсивно, органические вещества быстро минерализуются, и гумус почти не накапливается. В *бике* пустынь преобладает азотный тип химизма при значительном участии Cl и S. В солончаковых пустынях – хлоридный тип химизма. К пустынной группе относятся четыре основных типа ландшафта.

Полярные пустыни. Они распространены на арктических островах и в Антарктике. Фитомасса полярной пустыни составляет 50 ц/га. Формирование пустынного загара (железистых и марганцевистых пленок на поверхности пород), новообразований карбонатов кальция, гипса и легкорастворимых солей сближает полярные пустыни с пустынями умеренного и тропического поясов. Однако резко отличный термический режим, мерзлота, особо важная роль птиц в *бике*, преобладание лишайников и водорослей, образование сапропеля в озерах придает полярным пустыням геохимическое своеобразие.

Высокогорные пустыни (тибетско-памирские). Сильная инсоляция и испарение в сочетании с ничтожным количеством осадков обуславливают исключительную сухость климата и формирование пустынных ландшафтов. Разложение растительных остатков в условиях холодного климата протекает медленно. В этих пустынях выветривание протекает по карбонатному типу. В почвах и коре выветривания накапливается CaCO_3 , почвы и воды имеют щелочную среду.

Разреженная травянистая и кустарниковая растительность высокогорных пустынь способствует накоплению Ca, P в верхних горизонтах почв. В депрессиях рельефа формируются хлоридные солончаки и соленые озера. В илах озер развита десульфуризация, в атмосферу выделяется сероводород. Широко распространены мерзлотные явления, солифлюкция, местами встречается многолетняя мерзлота.

Суббореальные пустыни (казахстанско-монгольские). Это пустыни умеренного пояса с жарким летом, морозной зимой и холодной сухой весной. Годовое количество осадков составляет 100–200 мм, большая их часть выпадает летом, обеспечивая возможность произрастания полынных и полынно-солянковых сообществ на бурых и серо-бурых пустынных почвах. Для суббореальных пустынь характерно несколько классов и все три основных рода геохимических ландшафтов.

В пустынях кальциевого и кальциево-натриевого классов преобладает III род – пустынные низкогорья и мелкосопочки. Для них характерны полынные

сообщества, достаточно интенсивный водообмен, преобладание маломинерализованных трещинно-грунтовых вод гидрокарбонатно-кальциевого и натриевого состава. В автономных и трансэлювиальных позициях на обызвесткованном элювии формируются примитивные бурые и серо-бурые почвы.

В элювиально-аккумулятивных ландшафтах подгорных равнин и нижних частей склонов сопок образуются карбонатный щебнистый пролювий и делювий, на котором развиты полнопрофильные, иногда солонцеватые, бурые и серо-бурые почвы.

Для автономных и транзитно-аккумулятивных ландшафтов с глубоким уровнем грунтовых вод характерны кальциевый и кальциево-натриевый класс миграции. Щелочная окислительная среда почв, малое количество органического вещества в них, чрезвычайно слабое увлажнение определяют низкую интенсивность миграции большинства элементов.

В межгорных впадинах и котловинах на озерно-солончаковых отложениях формируются солончаки и типичные соры (пересыхающие соленые озера). Радиальная геохимическая контрастность автономных ландшафтов связана с достаточно резкой гранулометрической и физико-химической дифференциацией почвенного профиля. Даже слабое накопление гумуса и мелкозема в верхних горизонтах почв определяет аккумуляцию в них биофилов – N, P и микроэлементов-комплексобразователей – Y, Zr, Sc на совмещенном био-геохимическом и сорбционном барьерах.

Важное значение в миграции и аккумуляции химических элементов имеет высшая растительность. Многие пустынные растения имеют высокую зольность (10–40 %) и после минерализации обогащают поверхностные горизонты почв щелочными и щелочно-земельными элементами, усиливающими засоленность и карбонатность почв.

Латеральная миграция микроэлементов в пустынных низкогорьях и мелкосопочниках в целом выражена слабо. Только микроэлементы, участвующие в испарительной концентрации (B, Sr, Mo), могут накапливаться в супераккумулятивно-аккумулятивных ландшафтах межгорных солончаковых впадин. Важное значение в пустынных низкогорьях и сопряженных с ними депрессиях имеют процессы региональной миграции подземных вод, определяющие многие геохимические особенности соленакопления, а не локальная склоновая миграция солей.

Каменистые и глинистые пустыни II и I родов развиты на подгорных равнинах и возвышенностях Центральной Азии. Для более высоких уровней рельефа характерны кальциевые ландшафты, в которых на лессовидных суглинках или элювиальных и делювиально-щебнистых пролювиальных отложениях формируются незасоленные почвы под эфемерно-

полукустарничковыми полынными сообществами. Радиальная геохимическая дифференциация почв слабая из-за низкого содержания гумуса, карбонатности профиля и монотонного распределения илистой фракции.

Геохимические барьеры в целом не характерны. Лишь в самых нижних горизонтах иногда встречаются гипсовые горизонты и скопления легкорастворимых солей (испарительный барьер). Наиболее дифференцированы серо-бурые почвы за счет присутствия в профиле плотного, иногда солонцеватого иллювиального горизонта (сорбционный барьер) и более контрастного распределения карбонатов и гипса.

Песчаные пустыни. Представлены несколькими видами, часть которых относится ко II роду («барханные», «бугристые» и прочие пески), а часть – к I роду (песчаные равнины). Такие ландшафты формируются на перевеянных аллювиальных или коренных песках под псаммофитными травянистыми и кустарниковыми сообществами. Ведущими факторами, влияющими на миграцию химических элементов в песчаных пустынях, является ветер, легкий гранулометрический состав почв, чрезвычайно малое атмосферное увлажнение и практически полное отсутствие поверхностного стока.

На достаточно однородном литолого-геоморфологическом фоне более четко выражена фито- и зоогеохимическая неоднородность почв и биогеохимическая специализация растений. При близком залегании грунтовых вод геохимические особенности ландшафтов определяются составом и степенью минерализации грунтовых вод.

Почвы песчаных пустынь карбонатны с поверхности и, как правило, не засолены, не имеют геохимических барьеров и отличаются весьма слабой радиальной дифференциацией элементов. Под кронами черного и белого саксаула и кустарников в почвах накапливаются пылеватые частицы, легкорастворимые соли, карбонаты, местами увеличивается щелочность и возрастает геохимическая контрастность поведения микроэлементов.

Геохимическим разнообразием отличаются термитники, служащие местами концентрации легкорастворимых солей, Р и некоторых микроэлементов (Sr, V, Ag, Mo, B). Во впадинах среди песков с близким залеганием грунтовых вод формируются солончаки с интенсивной испарительной концентрацией микроэлементов – Sr, Li, Br, Mo, B. Латеральная миграция элементов для песчаных пустынь не характерна.

Пустыни солонцового класса. Солонцовые ландшафты занимают элювиально-аккумулятивные позиции, где под полынно-солянковыми сообществами формируются бурые солонцеватые, серо-бурые солонцеватые почвы и солонцы, часто солончаковатые. Биогенное засоление почв связано с высоким содержанием Na, Cl, S в опаде полыней и солянок.

Солонцеватость определяет контрастность радиальной геохимической дифференциации почв, солонцеватые горизонты которых служат сорбционными барьерами, на которых концентрируются многие химические элементы. Для нижней части почвенного профиля характерны реликтовые испарительные барьеры. Латеральная миграция большинства элементов (кроме легкорастворимых солей) весьма ограничена.

Пустыни гипсового класса. Среди гипсовых пустынь известны все три основных рода ландшафта, но абсолютно преобладают гипсовые пустыни на аккумулятивных пластовых равнинах и плато (I род), сложенных преимущественно морскими засоленными отложениями. Наиболее грандиозная гипсовая пустыня – плато Устюрт. Главная особенность этих ландшафтов – высокое содержание остаточного гипса в автоморфных серо-бурых почвах и развитие особой флоры «гипсофитов», в золе которых сульфаты преобладают над хлоридами. В бике особенно велико участие S.

Уровни содержания химических элементов и радиальная дифференциация ландшафтов в значительной мере определяются содержанием гипса в почвах и положением гипсового горизонта в почвенном профиле. Как правило, горизонты, где содержание гипса выше 10–15 %, обеднены многими микроэлементами («гипсовое выщелачивание»), за исключением Sr. Содержание Sr в гипсоносных почвах может достигать 0,5–1 %, образуется минерал целестин (SrSO_4). Это определяет аккумуляцию Sr в гипсофитах.

Солончаковые пустыни относятся к Cl – Na, SO_4 – Na и другим классам, занимая как огромные пространства, так и небольшие площади в качестве члена ландшафтной катены: пустынный мелкосопочник – шоровый солончак в депрессии. В Азии наиболее грандиозны солончаковые пустыни Центрального Ирана и Тибета.

Субтропические (средиземноморские) пустыни. В отличие от суббореальных пустынь осадки (100–150 мм) здесь выпадают преимущественно в холодный сезон. Весной гидротермические условия наиболее благоприятны для вегетации, создании основной массы живого вещества, развития эфемерной растительности, наиболее интенсивного протекания биогеохимических процессов. В субтропических пустынях выделяются те же классы и роды, что и в пустынях суббореальных.

На кристаллических породах здесь развиты ландшафты кальциевого класса, на засоленных породах – соленосного с мощными солевыми корами. В субтропических пустынях широко распространены и кальциево-натриевые, и солонцовые ландшафты с ксеросолонцовыми почвами (серо-бурыми пустынными, красно-бурыми пустынными) с отчетливой радиальной дифференциацией карбонатов, гипса, легкорастворимых солей и емкости поглощения в

почвенном профиле, что ведет к формированию сорбционных и реликтовых испарительных геохимических барьеров в иллювиальных горизонтах.

Примитивно-пустынные ландшафты распространены в различных климатических условиях, но наибольшую площадь занимают в полярных районах, пустынях и высокогорьях. Биомасса мала, основную роль в *бике* играют водоросли, частично лишайники и грибы. Высшие растения отсутствуют, или их число крайне ограничено.

Некоторые примитивно-пустынные ландшафты являются результатом деградации ландшафтов других групп под влиянием ухудшения условий существования организмов: понижения температуры, усиления сухости, засоленности. Так, в сухих степях увеличение засоленности приводит к образованию шоровых солончаков, лишенных высшей растительности. Понижение температуры в начале ледникового периода привело к образованию полярных пустынь.

Лишайниковые и водорослевые ландшафты скал часто являются первой стадией развития ландшафтов на изверженных породах, которая в условиях влажного и теплого климата скоропреходяща. В условиях Арктики, высокогорий и пустынь данная стадия устойчива и существует в течение длительного времени. После микроорганизмов первыми видимыми поселенцами на скалах являются лишайники и некоторые водоросли.

Примитивные пустыни хлоридно-сульфатного класса формируются в условиях пустынного климата и расчлененного рельефа на соленосных породах. Четвертичные поднятия и последующая эрозия вскрыли соленосные породы, растворимые соли которых включились в современную миграцию. В результате развивается соляной карст, грунтовые и поверхностные воды представляют собой рассолы.

Почвы в примитивных пустынях сильно засолены. Типоморфные элементы автономного ландшафта – Na, Cl, S. Почва – остаточный литогенный солончак. Подчиненные ландшафты представлены соляными ручьями, озерами и солончаками. Соленакпление в понижениях рельефа особенно мощно. В коре выветривания накапливается гипс.

Гамады и такыры. Очень низка интенсивность бика в крайне аридных районах, где распространены наиболее безжизненные каменистые пустыни – *гамады*. Их плоская или слабонаклонная поверхность лишена высшей растительности и покрыта слоем черного щебня. Под щебнем залегает карбонатная пористая корка и подкорковый гипсовый горизонт.

В глинистых пустынях депрессии рельефа с глубоким уровнем грунтовых вод нередко заняты *такырами*, на которых периодически застаиваются атмосферные воды. Такыры имеют паркетобразную поверхность, разбитую

сетью трещин на полигональные отдельности. В их формировании большую роль играют диатомовые и сине-зеленые водоросли, которые подщелачивают среду и активно разрушают алюмосиликаты. Верхняя плотная корка такыров является сорбционным барьером, а нижележащий гипсовый горизонт – испарительным барьером.

К каменистым пустыням, расположенным на древних плато, приурочены серо-бурые почвы. С поверхности они покрыты пористой коркой, под которой залегает слюеватый рыхлый горизонт, часто переполненный гипсом. Характерно высокое содержание битумов. Широкое распространение засоления и солонцеватости почв в пустынях – результат высокой минерализации растительных остатков и засоленности почвообразующих пород в условиях бессточного рельефа местности.

Литература

1. Геохимия ландшафтов. – М. : Изд-во Москов. гос. ун-та, 1975. – 219 с.
2. Глазовская М. А. Геохимические основы типологии и методики исследования природных ландшафтов / М. А. Глазовская. – М. : Изд-во Москов. гос. ун-та, 1964. – 230 с.
3. Глазовская М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР / М. А. Глазовская. – М. : Высшая школа, 1988. – 324 с.
4. Добровольский В. В. Основы биогеохимии / В. В. Добровольский. – М. : Высшая школа, 1998. – 413 с.
5. Касимов Н. С. Геохимия степных и пустынных ландшафтов / Н. С. Касимов. – М. : Изд-во Москов. гос. ун-та, 1988. – 254 с.
6. Перельман А. И. Геохимия / А. И. Перельман. – М. : Высшая школа, 1989. – 598 с.
7. Перельман А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман, Н. С. Касимов. – М. : Астрель – 2000, 1999. – 768 с.
8. Полюнов Б. Б. Геохимические ландшафты / Б. Б. Полюнов // Географические работы : сб. – М., 1952. – С. 381–393.
9. Протасова Н. А. Микроэлементы (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Ga, Be, Ba, Sr, B, I, Mo) в черноземах и серых лесных почвах Центрального Черноземья / Н. А. Протасова, А. П. Щербаков. – Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 2003. – 368 с.
10. Родин Л. Е. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара / Л. Е. Родин, Н. И. Базилевич. – М. – Л. : Наука, 1965. – 215 с.
11. Романова Э. П. Современные ландшафты Европы / Э. П. Романова. – М. : Изд-во Москов. гос. ун-та, 1997. – 312 с.
12. Щербаков А. П. Геохимия макро- и микроэлементов в зональных почвах Центрального Черноземья России / А. П. Щербаков, Н. А. Протасова, А. Б. Беляев. Антропогенная эволюция черноземов. : сб. – Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 2000. – С. 175–203.

Учебное издание

ГЕОХИМИЯ ПРИРОДНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Учебно-методическое пособие для вузов

Составитель

Протасова Нина Алексеевна

Редактор И.Г. Валынкина

Подписано в печать 21.03.08. Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 2,1.

Тираж 100 экз. Заказ 488.

Издательско-полиграфический центр

Воронежского государственного университета.

394000, г. Воронеж, пл. им. Ленина, 10. Тел. 208-298, 598-026 (факс)

<http://www.ppc.vsu.ru>; e-mail: pp_center@ppc.vsu.ru

Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического центра

Воронежского государственного университета.

394000, г. Воронеж, ул. Пушкинская, 3. Тел. 204-133.