

*На правах рукописи*

*О.Железнова*

**ЖЕЛЕЗНОВА ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА**

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА БИОГЕОХИМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ  
ЭКОСИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА  
(НА ПРИМЕРЕ ПОДТАЕЖНЫХ ЛЕСОВ ЮЖНОЙ МЕЩЕРЫ)**

03.02.08 – Экология (биологические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Москва – 2017

Работа выполнена на кафедре судебной экологии с курсом экологии человека Экологического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН), г. Москва

**Научный руководитель:** **Черных Наталья Анатольевна**  
доктор биологических наук, профессор,  
зав. кафедрой судебной экологии с курсом экологии  
человека экологического факультета РУДН

**Официальные оппоненты:** **Гераськин Станислав Алексеевич**  
доктор биологических наук, профессор,  
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский  
институт радиологии и агроэкологии»,  
заведующий лабораторией радиобиологии и  
экотоксикологии сельскохозяйственных растений

**Черников Владимир Александрович**  
доктор сельскохозяйственных наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Российский государственный  
аграрный университет – МСХА имени К.А.  
Тимирязева», профессор кафедры экологии

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук».

Защита состоится «22» марта 2018 г. в 14 часов 00 минут на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.203.38 при Российском университете дружбы народов по адресу: 115093, г. Москва, Подольское шоссе, д. 8/5, экологический факультет.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6 и на сайте [dissovet.rudn.ru](http://dissovet.rudn.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » января 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат биологических наук



Е.А. Ванисова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Биологическая продуктивность представляет собой фундаментальное свойство биосферы и означает способность живого вещества воспроизводить биомассу и образовывать тем самым биотический покров (Базилевич Н.И., 1993). Сегодня биологическая продуктивность лесов рассматривается как их основная характеристика, определяющая ход процессов в лесных экосистемах и используемая в целях экологического мониторинга, устойчивого ведения лесного хозяйства, моделирования продуктивности лесов с учетом глобальных изменений, изучения структуры и биоразнообразия лесного покрова, оценки углероддепонирующей емкости лесов (Усольцев В.А., Залесов С.В., 2005). С геохимических позиций биологическая продуктивность, наряду с водным выносом, обеспечивает устойчивость экосистем к антропогенному загрязнению (Manual on Methodologies and Criteria ..., 2004).

Проблема биологической продуктивности в учении об экосистемах и биогеоценозах порождает цикл исследований, связанных, во-первых, с образованием, трансформацией и аккумулярованием органического вещества, во-вторых, с анализом факторов, обуславливающих продуктивность, в-третьих, со скоростью потоков энергии и циркуляции биогеохимических элементов через систему и во взаимодействиях с другими системами (Уткин А.И., 1975). Исследования по данным направлениям особенно активно стали проводиться с середины 1960-х гг. в связи с выполнением работ по Международной биологической программе (Базилевич Н.И., 1993).

Сегодня, несмотря на большое количество исследований биопродуктивности лесов, связанных с оценкой их роли в глобальных экологических циклах и стабилизации климата (Усольцев В.А., 2001), отдельные аспекты данной проблемы остаются по-прежнему слабо изученными. Так, для многих работ, посвященных оценке биопродуктивности лесов и определяющим ее факторам, характерно невысокое пространственное разрешение, не позволяющее проследить локальные особенности протекания продукционных процессов и вскрыть причины их пространственных вариаций. Изучая емкость и интенсивность биологических круговоротов, исследователи часто оставляют без внимания сезонную динамику элементов в растительных тканях. При этом к настоящему времени относительно хорошо изучено влияние различных экологических факторов (в первую очередь, свойств почвы) на накопление тяжелых металлов (ТМ) и радионуклидов (РН) растениями, тогда как влияние генотипического фактора, определяемого биологическими особенностями вида, до сих пор изучено слабо. Зачастую достаточным результатом биогеохимических исследований считается установление

концентраций элементов в тканях и органах растений, без серьезной интерпретации полученных значений. В то же время комплексных исследований биопродуктивности, в том числе определяющих ее факторов и биокруговоротов, сравнительно мало. Это обуславливает актуальность выбранной темы.

Следует подчеркнуть, что, во-первых, Южная Мещера расположена в зоне «гидротермического перелома» (Глебова О.В. и др., 2000) – границе бореального и суббореального термических поясов. В первом из них рост атмосферного увлажнения ведет к снижению продуктивности экосистем, а во втором, напротив, к ее увеличению (Базилевич Н.И. и др., 1986). Это создает контрастные условия для развития растений на положительных и отрицательных элементах рельефа даже при небольших перепадах относительных высот и способствует межгодовой вариации прироста даже в условиях слабой динамики климата. Во-вторых, Южная Мещера, занятая хвойно-широколиственными лесами, расположена в центре староосвоенной территории России и испытывает влияние хозяйственной деятельности, что делает комплексные биогеохимические исследования особенно актуальными.

**Цель исследования** – изучение закономерностей биогенной миграции тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd) и радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) в лесных экосистемах Южной Мещеры, как фактора их устойчивости к загрязнению.

В соответствии с целью были сформулированы следующие **задачи**:

1. Количественная оценка запасов различных фракций биомассы древесных пород Южной Мещеры и выявление закономерностей пространственного распределения аномалий прироста древостоя.
2. Анализ влияния литогенетических ландшафтных факторов на биопродуктивность древесных пород Южной Мещеры.
3. Оценка вклада климатических факторов в формирование биологической продукции в лесных экосистемах.
4. Определение закономерностей транспорта тяжелых металлов и радионуклидов в системе растительных органов и установление барьерных механизмов аккумуляции элементов в фитомассе.
5. Оценка потенциала биотического блока по мобилизации и иммобилизации ТМ и РН, определяющего уровень естественной биогеохимической устойчивости лесных экосистем к химическому загрязнению.

**Объект исследования** – подтаежные лесные экосистемы Южной Мещеры (в пределах Рязанской области).

**Предмет исследования** – факторы, определяющие биогеохимическую устойчивость лесных экосистем к загрязнению ТМ и РН (видовой состав растительности, биологическая продуктивность, геохимическая специализация видов, закономерности распределения химических элементов в фитомассе).

**Научная новизна работы.** В работе впервые дана комплексная оценка специфики ландшафтных процессов в Южной Мещере: рассмотрены ключевые факторы, определяющие величину биопродуктивности древостоя лесных экосистем (особенности литогенной основы, почвенного покрова, климатическая динамика). Установлено территориальное соответствие локальных вариаций прироста деревьев по диаметру и неоднородностей литогенной основы, которые опосредованно – через интенсивность водообмена – определяют пространственную динамику продуктивности лесных экосистем. Проведена структурно-генетическая типизация природных комплексов с подробностью, соответствующей детальности данных Государственного учета лесного фонда.

Установлены масштабы и закономерности временной динамики прироста древостоя в различных топоэкологических условиях Южной Мещеры. Впервые анализ реперных лет выполнен совместно с анализом динамики индекса NAO (Североатлантического колебания), как доминирующего климатического режима Атлантико-Европейского сектора.

Впервые дано объяснение механизма гипераккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  растениями. Предложенный нами механизм гипераккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  позволяет объединить такие важнейшие особенности гипераккумуляторов, как их способность, с одной стороны, к сверхпроизводству органических кислот в побегах и, с другой стороны, к активному поглощению и транспорту К при пониженной селективности К-транспортных систем. Предложенному механизму удовлетворяют все известные на сегодня гипераккумуляторы  $^{137}\text{Cs}$ .

Результаты определений содержания ТМ и РН в биомассе растений использованы для расчета коэффициентов транслокации, дискриминации и контрастности; интерпретация полученных данных осуществлена с привлечением результатов исследований в области биохимии, физиологии растений, генетики. Рассматривается один из наименее изученных факторов, влияющих на накопление ТМ и  $^{137}\text{Cs}$  растениями, – генотипический фактор, определяемый биологическими особенностями вида. Следует отметить, что в биогеохимических исследованиях данному фактору до сих пор уделяется недостаточное внимание.

Осуществлен синтез пространственных оценок продуктивности и запасов фитомассы сообществ с оценками содержания элементов в различных структурных компонентах фитоценозов; определен потенциал растительности лесных экосистем Южной Мещеры по мобилизации и иммобилизации ТМ и РН.

***Положения диссертации, выносимые на защиту.***

1. Установлено, что ведущая роль в формировании характера изменчивости биопродукционного процесса в Южной Мещере принадлежит пространственным

вариациям интенсивности водообмена, тесно связанным с глубиной залегания и морфологией поверхности коренных пород.

2. Показано, что биопродуктивность древостоя в контрастных топоэкологических условиях обусловлена влиянием различных метеопараметров и гидрологических условий данного года и предшествующих лет. Условия, создаваемые экстремально высокими и экстремально низкими значениями индекса Североатлантического колебания (NAO), неблагоприятны для прироста древостоя, в то время как условия «переходных» периодов способствуют повышению биопродуктивности древесных пород.

3. Выявлены следующие закономерности распределения ТМ и РН в органах и тканях древесных растений: аккумуляция биофильных Cu, Zn и  $^{40}\text{K}$  в надземных органах; накопление токсичных Cd и  $^{137}\text{Cs}$  в корнях; повышенная аккумуляция Cd и Cu в древесине ствола.

При этом ежегодная долговременная иммобилизация элементов в тканях ствола составляет всего 5,5-7,5% (для ТМ) и 1,3-2,3% (для РН) от их суммарной фиксации в приросте всех компонентов фитоценоза.

4. Установлено, что видами - гипераккумуляторами  $^{137}\text{Cs}$  являются ариданитные и гумидокатные пионерные растения, интенсивно питающиеся нитратным азотом и восстанавливающие его в надземных органах.

Активное поглощение Zn и Cd характерно для гумидокатных видов – березы повислой (*Betula pendula*) и осины обыкновенной (*Populus tremula*); интенсивное накопление Cu свойственно для ариданитного вида – дуба черешчатого (*Quercus robur*).

5. Показано, что в экосистемах Южной Мещеры Zn является слабodefицитным элементом, а Cd – избыточным.

**Практическая значимость.** Результаты диссертационной работы могут быть использованы в лесном хозяйстве при разработке системы мероприятий по повышению устойчивости и продуктивности лесов, при планировании лесохозяйственных мероприятий. Разработанные зависимости запасов фитомассы от таксационных показателей древостоя могут применяться для оценки запасов фитомассы лесов центральной части Восточно-Европейской равнины. Установленные закономерности временной динамики прироста древостоев могут быть использованы для прогноза биопродуктивности в условиях климатических изменений.

Успехи фиторемедиации почв, загрязненных одним из наиболее токсичных техногенных радионуклидов –  $^{137}\text{Cs}$  – во многом определяются результатами поиска растений - гипераккумуляторов, способных к интенсивному поглощению  $^{137}\text{Cs}$  корнями и его транслокации в надземные органы. Предложенный нами механизм

гипераккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  растениями позволяет осуществлять отбор растений, пригодных для фиторемедиации загрязненных данным радионуклидом почв.

Установленные закономерности распределения ТМ в фитомассе древесных растений (в частности, барьерные ткани растений в отношении ТМ) могут быть использованы для выбора наиболее удобных биообъектов для экологического мониторинга. При организации и проведении экологического мониторинга могут быть использованы также результаты балансовых оценок, позволяющие судить о дефицитности и избыточности элементов в окружающей среде.

Материалы диссертации могут быть внедрены в учебный процесс и включены в курс лекций и лабораторный практикум по дисциплинам «Биогеохимия», «Геохимия ландшафта», «Экология», «Ландшафтоведение».

**Апробация.** Материалы исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на II молодежной научно-практической летней школе Русского географического общества «География в современном мире: проблемы и перспективы» (Калужская область, 2014); Международной молодежной научной конференции «People. Science. Innovations in the new millennium» (Москва, 2015); Всероссийской научной конференции «Геохимия ландшафтов» (к 100-летию А.И. Перельмана) (Москва, 2016); Международной молодежной научной конференции «Environmental problems of the third millennium» (Москва, 2016); XXI Международной Пущинской школе-конференции молодых ученых «Биология – наука XXI века» (Пущино, 2017); IX Международном конгрессе «Soils of Urban Industrial Traffic Mining and Military Areas» (Москва, 2017).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 работ, из них 4 – в изданиях из списка ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов, списка литературы, 11 приложений на 37 страницах. Список литературы включает 308 источников, в том числе 107 – на иностранном языке. Работа изложена на 260 страницах (не считая приложений) и включает 35 таблиц и 43 рисунка, в том числе карты-схемы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе «Обзор литературы»** рассмотрены факторы и существующие методы оценки биологической продуктивности лесных экосистем, а также современные представления об аккумуляции и миграции ТМ и РН в растениях. Если ранее значения биопродуктивности экстраполировались с пробных площадей на территорию региона или биома (Базилевич Н.И., 1993), то сегодня единственно приемлемым путем для определения запасов фитомассы является

совмещение экспериментальных данных с базами данных ГУЛФ на основе многофакторных регрессионных моделей (Усольцев В.А., 2001; 2002).

Важнейшим фактором, определяющим величину биопродуктивности экосистем, является климат; другие факторы – подстилающие породы, рельеф и почвенный покров – определяют локальные вариации продукционного процесса (Базилевич Н.И. и др., 1986; Нагимов З.Я., 2000). Сегодня факторы биопродуктивности оцениваются и изучаются на разных пространственно-временных масштабах и в рамках различных научных направлений: лесной таксации, лесоведения, почвоведения, ландшафтоведения, дендрохронологии, ландшафтной дендрохронологии, биогеоценологии и экологии (Коломыщ Э.Г., 2003; Дьяконов К.Н., Беляков А.И., 2006; Ханина Л.Г. и др., 2006; Neuwirth V. et al., 2007; Щепашенко Д.Г., 2008; Zhang Y. et al., 2008; Бондарь Ю.Н., 2009; Парфенова Е.И., Чебакова Н.М., 2009; Adams H.R. et al., 2014; Усольцев В.А. и др., 2015 и др.).

К важнейшим факторам, влияющим на накопление ТМ и РН растениями, относятся: 1) природа и свойства поглощаемого химического элемента (иона); 2) ландшафтно-геохимические факторы, определяемые условиями среды обитания; 3) внутренние (генотипические) факторы, определяемые биологическими особенностями конкретного вида растений; 4) стадия развития растения (возраст) (Nimis P.L., 1996; Прохорова Н.В. и др., 1998; Перельман А.И., Касимов Н.С., 1999; Безуглова О.С., Орлов Д.С., 2000; Винокурова Р.И., 2003; Deram A. et al., 2006; Salmon P. et al., 2009; Романцова Н.А., 2012; Сибиркина А.Р., 2014 и др.). Анализ работ отечественных и зарубежных исследователей показал, что в настоящее время наблюдается существенный дисбаланс в степени изученности влияния на биопоглощение элементов, с одной стороны, почвенных свойств, и с другой – генотипических факторов (биологических особенностей вида).

Рассмотрена роль фитомассы лесных экосистем в обеспечении их устойчивости к поступлению загрязняющих веществ. В методологии критических нагрузок – наиболее передовом механизме оценки эколого-геохимической устойчивости – древесная растительность выступает в качестве важнейшего источника естественной буферности экосистем к загрязнению, поскольку обеспечивает долговременное изъятие элементов из миграции за счет их иммобилизации в тканях ствола и вероятное последующее их отчуждение при рубках (Manual on Methodologies and Criteria ..., 2004).

**Во второй главе «Объекты и методы исследования»** охарактеризован объект исследования, приведены используемые методики.

Объект исследования – лесные экосистемы на юго-западе Мещерской низины в центре Восточно-Европейской равнины (Рязанская область). Специфика почвенно-растительных условий района исследований определяется затрудненной



гидродинамикой и низкотрофными песчаными субстратами – наследием четвертичных оледенений; характерным лимитирующим фактором биопродуктивности является переувлажнение. К видам - эдификаторам растительных сообществ относятся сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), мелколиственные породы – береза повислая (*B. pendula*) и осина обыкновенная (*P. tremula*), в условиях повышенной трофности субстрата присутствуют также ольха черная (*Alnus glutinosa*), дуб черешчатый (*Q. robur*) и ель европейская (*Picea abies*). Среднее для всей территории участие пород в древостое составляет: сосна – 48,8%; береза – 39,8%; осина – 6,4%; ольха – 2,8%; дуб – 1,3%; ель – 0,9%.

На относительно более дренированных участках междуречий преобладают дерново-сильноподзолистые, среднеподзолистые и слабоподзолистые почвы; на слабо дренированных участках – дерново-глеевые оподзоленные; на заболоченных участках – болотные почвы (перегнойно-глеевые, торфяно-перегнойно-глеевые и торфяные). Характерными особенностями почв являются низкие значения *pH* почвенного раствора, способствующие повышенной подвижности катионогенных элементов, а также низкое содержание гумуса и элементов питания. Для минеральных почв типично высокое содержание песчаной фракции (73%).

В табл. 1 приведены результаты определения концентраций ТМ в почвах Южной Мещеры в сравнении с экологическими нормативами (ЭН) их содержания. ЭН представляет собой верхний предел накопления элемента в почве данного типа при отсутствии техногенного загрязнения (Tobratov S.A. et al., 2016). Неблагоприятным с геохимических позиций устойчивости является превышение ЭН по подвижным формам, содержание которых отражает почвенные запасы элемента, доступные для поглощения растениями.

Таблица 1 – Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в почвах Южной Мещеры в сравнении с экологическими нормативами (ЭН) содержания металлов для песчаных и торфяных почв

ТМ		<i>Cu</i>		<i>Zn</i>		<i>Cd</i>	
		Минер.	Торф.	Минер.	Торф.	Минер.	Торф.
<i>ААБ</i>	Ю.Мещера	0,098 <i>0,066-0,135</i>	0,171 <i>0,104-0,231</i>	1,820 <i>0,895-3,450</i>	<b>7,719</b> <i>5,247-11,986</i>	<b>0,063</b> <i>0,037-0,088</i>	<b>0,179</b> <i>0,119-0,216</i>
	ЭН	0,24	0,32	6,0	2,45	0,055	0,078
<i>Вал.</i>	Ю.Мещера	<b>2,771</b> <i>2,342-4,082</i>	5,298 <i>4,430-6,378</i>	24,674 <i>8,145-56,213</i>	27,053 <i>20,371-37,553</i>	0,141 <i>0,051-0,309</i>	0,314 <i>0,150-0,427</i>
	ЭН	2,35	17,50	165,0	57,0	0,340	0,400

Примечание: **Полужирным шрифтом** выделены случаи превышения ЭН содержания металлов. *Курсивом* показан диапазон варьирования концентраций ТМ в пределах участков почвенно-биогеохимического опробования. ААБ – подвижные формы металла (экстракция ацетатно-аммонийным буфером с pH 4,8). Вал. – валовые несиликатные формы. Минер. – минеральные почвы; Торф. – торфяные почвы

Как следует из табл. 1, превышения ЭН по подвижным формам характерны для Zn (в случае торфяных почв) и Cd (в случае минеральных и торфяных почв). Превышения ЭН в случае Cd особенно опасны в связи с его высокой токсичностью (Cocozza C. et al., 2008).

В результате аварии на Чернобыльской АЭС территория исследования подверглась загрязнению техногенными радионуклидами, в том числе  $^{137}\text{Cs}$ . Характерной особенностью почвенного загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  является высокая пространственная мозаичность значений его удельной активности, зависящая от ландшафтных особенностей территории и траектории радиоактивных выпадений (Кривцов В.А. и др., 2011). Согласно нашим определениям, удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в почвах района исследований варьирует в пределах 6,6-138,6 Бк/кг для минеральных почв и 23,1-225,0 Бк/кг для торфяных почв.

Источником первичной информации о запасах фитомассы лесных экосистем послужили данные Государственного учета лесного фонда (ГУЛФ) для Солотчинского лесхоза за 1982, 1991-1992 и 2002 гг. Таксационные описания ГУЛФ были преобразованы в базу данных, содержащую характеристики древостоев и сведения о динамике лесопокрытых площадей для 300 лесных кварталов Солотчинского лесхоза (свыше 3000 лесотаксационных выделов).

Запасы отдельных фракций фитомассы рассчитывались на основе регрессионных зависимостей запасов от таксационных показателей древостоя. Для оценки воздействия экологических факторов на продуктивность древостоя рассчитывались коэффициенты благоприятности для той или иной фракции фитомассы (Кб):

$$K\bar{b} = \frac{B_{\text{факт}}}{B_{\text{ЗН}}}, \quad (1)$$

где  $B_{\text{факт}}$  – фактические запасы фракции (в абсолютно сухом состоянии, т/га) в пределах данного лесного выдела,  $B_{\text{ЗН}}$  – зональный возрастной норматив запасов (в абсолютно сухом состоянии, т/га) для подтаежных лесов центра Восточно-Европейской равнины в условиях современного климата, определяемый по базе данных В.А. Усольцева (2002).

При анализе ландшафтной структуры территории использованы топографические карты масштаба 1:25 000 и фондовые материалы Рязанского филиала ФБУ «Территориальный фонд геологической информации по ЦФО», применялись метод профилирования и фациально-урочищный анализ.

Для изучения климатических факторов, влияющих на биопродуктивность древостоя, использованы методы дендрохронологии. Отбор кернов и дисков сосны осуществлялся в 2009-2016 гг.; обработаны 64 индивидуальных хронологии из 17 точек пробоотбора. Подсчет ширины годовых колец осуществляется при помощи

программ *CDendro* и *CooRecorder*, расчет индексов прироста и стандартных описательных статистик производился в соответствии с принятыми в дендрохронологии подходами (Битвинскас Т.Т., 1974; Feliksik E., Wilczyński S., 2009; Latte N. et al., 2015). Сравнение хронологий осуществлялось с помощью корреляционного и кластерного анализов; для идентификации факторов, влияющих на прирост, применялись корреляционный анализ и метод реперных лет. Анализ реперных лет основан на ежегодных сравнениях аномалий прироста и соответствующих климатических условий (Cropper J.P., 1979) и считается общепринятым инструментом для изучения высокочастотных климатически индуцированных изменений в радиальном росте деревьев (Fischer S., Neuwirth B., 2013). За критерий аномальности прироста принималось его отклонение от среднего не менее чем на одно стандартное отклонение (Latte N. et al., 2015).

Для изучения закономерностей аккумуляции ТМ и РН в растительности лесных экосистем в 2013-2014 гг. осуществлялся сезонный отбор образцов почв и различных структурных компонентов фитоценозов. Пробоотбор производился по классическим методикам изучения биологического круговорота (Базилевич Н.И. и др., 1978); были отработаны 23 ключевых участка, различных по условиям произрастания и видовой структуре сообществ.

Химические анализы образцов фитомассы и почв осуществлялись нами лично на базе лаборатории геохимии ландшафтов при кафедре физической географии Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина по стандартным методикам (ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.36-2002; МУК 4.1.985-00; РД 52.18.191-89; ГОСТ 17.4.3.01-83; ГОСТ 17.4.4.02-84; Методические рекомендации ..., 1981; Методические указания ..., 1992). Для определения концентраций ТМ в фитомассе осуществлялось кислотное разложение образцов с использованием микроволновой системы и последующее упаривание для полного разрушения органических и минеральных комплексов исследуемых элементов. Для определения содержания форм ТМ в почве применялись: экстракция ацетатно-аммонийным буферным раствором с  $pH$  4,8 (извлекает подвижные, доступные для биопоглощения формы ТМ); экстракция 1-нормальной азотной кислотой (извлекает ТМ, способные перейти в раствор при экстремальном подкисляющем воздействии); экстракция царской водкой (извлекает валовые несиликатные формы ТМ). Определение концентраций ТМ (Cu, Zn, Cd) осуществлялось атомно-абсорбционным методом на пламенном спектрометре «Спектр 5-4»; всего проанализировано свыше 400 образцов. На основе измеренных сезонных концентраций элементов и весовых коэффициентов, соответствующих продолжительности каждого сезона, вычислялись среднегодовые концентрации элементов во фракциях фитомассы и в почвах (для подвижных форм).

Определение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  в образцах фитомассы и почв производилось с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра «МКС-01А «МУЛЬТИРАД-гамма» с программным обеспечением «Прогресс»; произведено измерение активности 368 образцов.

Статистическая обработка данных выполнена в программных пакетах *Statistica* и *Excel*, построение картосхем – в среде ГИС «Карта 2005» (производство ОКБ «Панорама»). Рассчитывались коэффициенты транслокации (TF) элементов из корней в надземные органы (по: Álvarez-Fernández A. et al., 2014; Jing Y. et al., 2014), коэффициенты дискриминации (DF) Zn/Cd и  $^{40}\text{K}/^{137}\text{Cs}$  (по: Zhu Y-G., Smolders E., 2000), коэффициенты контрастности распределения элементов в надземной фитомассе.

Для оценки потенциала биотического блока экосистем по мобилизации и иммобилизации элементов осуществлялся синтез пространственных оценок продуктивности и запасов фитомассы сообществ с оценками содержания элементов в различных структурных компонентах фитоценозов. Расчет баланса ТМ произведен относительно приходной статьи баланса в соответствии с идеологией метода критических нагрузок (Manual on Methodologies ..., 2004).

**В третьей главе «Литогенная основа как фактор пространственной неоднородности биопродукционных процессов древостоя»** рассмотрено влияние на прирост литогенетических ландшафтных факторов: глубины залегания коренных пород, морфологии их поверхности и современного рельефа.

Анализ данных бурения, топографических карт, полей биопродуктивности древостоя и материалов полевых исследований позволил выделить в пределах района исследований 11 геоморфологических элементов ранга ландшафтных местностей, отличающихся средней высотой, набором морфоскульптурных форм, историей развития и, следовательно, современной гидродинамикой (степенью дренированности) и структурой растительного покрова (рис. 1). Современный гидроморфизм, являясь ключевым фактором биопродуктивности древостоя, в условиях малоконтрастного рельефа Мещеры тесно связан с глубиной залегания и морфологией поверхности коренных пород.

В рельефе коренных пород изучаемой территории выражены два субширотных долинных вреза в карбоновые известняки, положившие начало Юго-Западной и Северной ложбинам, по которым осуществлялся основной сток в эоплейстоцене (рис. 1). Врезы разделены останцовым Бельским палеоводоразделом относительной высотой не менее 30 м. Анализ полей биопродуктивности древостоя и геолого-геоморфологических профилей показал, что наиболее устойчивые отрицательные аномалии прироста приурочены к осям доплейстоценовых эрозионных ложбин (местности IX и X на рис. 1). При этом факторами,

снижающими прирост, являются слабая дренированность и широкое развитие заболачивания. Максимальные значения биопродуктивности в пределах района исследований наблюдаются в местности VII, приуроченной к вершине погребенного Бельского известнякового останца. Плотность известняка в 1,20–1,33 раза выше, чем плотность иных пород, слагающих территорию, его локальные выступы формируют положительные гравитационные аномалии, стимулирующие водообмен и снижающие эффект переувлажнения – характерного для Южной Мещеры лимитирующего прирост фактора. В современном рельефе местность VII приурочена к одной из наиболее низких гипсометрических ступеней. Однако в условиях малоcontrastного рельефа и господства песчаных отложений влияние погребенной морфоструктуры на динамику влаги оказывается сильнее и способствует росту интенсивности водообмена и продукционных процессов.

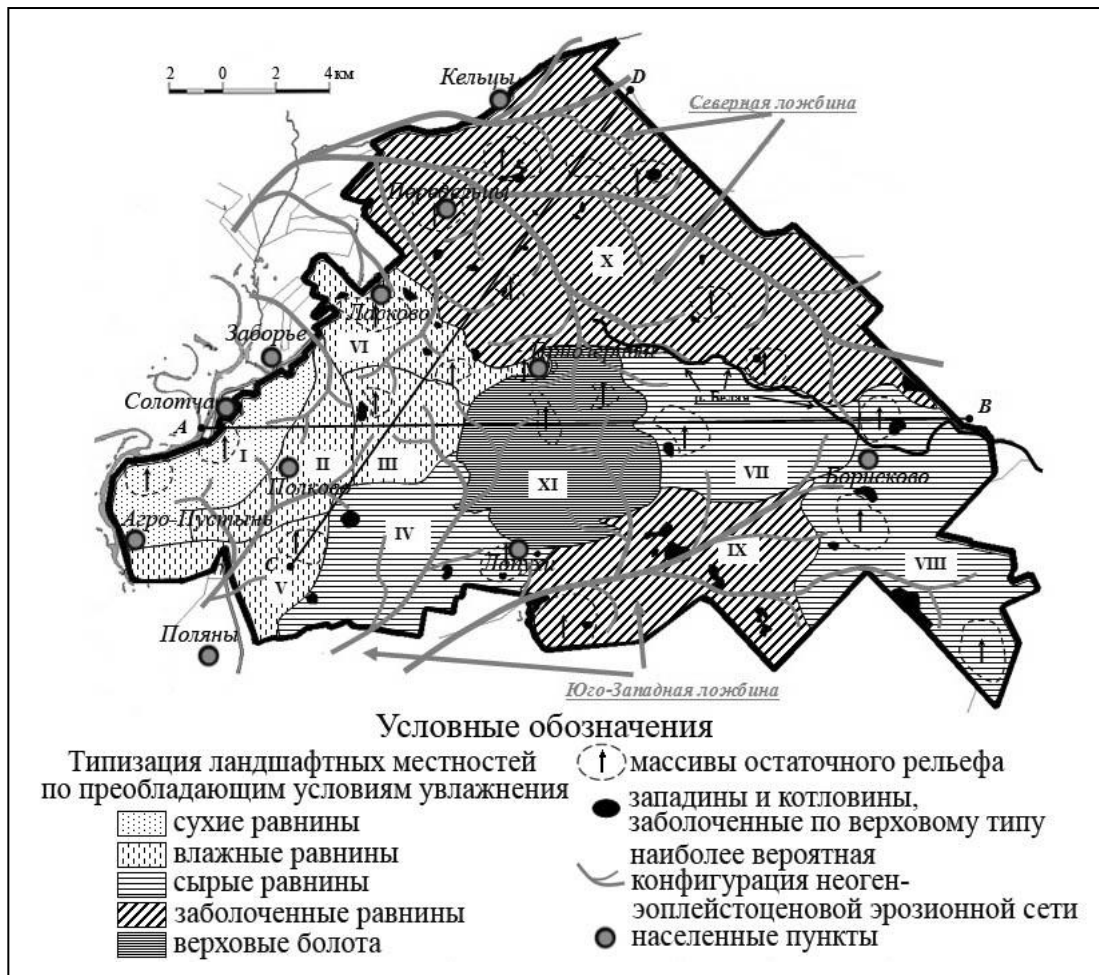


Рисунок 1 – Основные элементы ландшафтной структуры территории исследования

Примечание: А-В; С-Д – линии геолого-геоморфологических профилей. I-XI – основные геолого-геоморфологические неоднородности: I – Солотчинская останцовая местность; II – Полковская депрессия; III – Пяткинская возвышенность; IV – Лопуховская наклонная равнина; V – Полянская наклонная равнина; VI – Ласковская поозерная равнина; VII – Борисковская равнина; VIII – Дорофеевская равнина; IX – Темновская равнина (бывшая Юго-Западная ложбина стока); X – Переделецкая равнина (бывшая Северная ложбина стока); XI – Красное болото

**В четвертой главе «Пространственно-временные факторы продуктивности лесных экосистем Южной Мещеры»** рассмотрены эдафические (трофность и влажность почвы) и гидроклиматические (температура, осадки, характеристики речного стока, циркуляционные условия (индекс Североатлантического колебания)) факторы, влияющие на прирост древостоев.

На основе разработанных нами уравнений зависимости запасов различных фракций фитомассы от таксационных показателей древостоя рассчитаны запасы биомассы древесины и коры ствола, ветвей, листвы и корней для древесных пород Южной Мещеры. Анализ коэффициентов благоприятности (Кб) показал, что запасы биомассы сосны на лесопокрытой площади территории исследования выше зональной возрастной нормы (Кб = 1,04), остальных древесных пород – ниже нормы (Кб < 1). В большинстве сообществ полнота древостоя выше модальной возрастной нормы; исключением являются дубовые древостои.

Проанализировано влияние на рост леса типов лесорастительных условий по П.С. Погребняку (1968). Установлено, что особенности протекания продукционного процесса на локальном уровне определяются богатством и влажностью почвы. Максимальная продуктивность сосны наблюдается в свежих суборях (тип лесорастительных условий В2); березы и других пород – во влажных простых и сложных суборях (В3 и С3); минимальный прирост всех пород характерен для лесных болот, сырых боров и суборей (А5, В5, В4, А4).

Анализ динамики радиального прироста сосны (породы с максимальной долей в лесопокрытой площади) в различных топоэкологических условиях показал, что, несмотря на территориальную близость, наиболее крупные геолого-геоморфологические неоднородности (останцовые массивы московского возраста) отличаются от смежных влажных равнин и болот закономерностями продуктивности древостоев. Согласно результатам корреляционного анализа индексов прироста с климатическими факторами, между местообитаниями избыточного и недостаточного увлажнения наблюдаются принципиальные различия в наборе значимо влияющих на прирост метеопараметров.

Для контрастных по увлажненности местообитаний Южной Мещеры выделены положительные и отрицательные реперные годы (рис. 2). Их анализ, выполненный совместно с анализом динамики индекса Североатлантического колебания (NAO), показал, что минимальные приросты формируются в годы с экстремально высокими (1995 г. и вся первая половина 1990-х гг.) и экстремально низкими (1996 г., 1960-е гг.) значениями индекса NAO. При экстремально высоких значениях NAO мягкие влажные зимы создают условия для переувлажнения на болотах и плоских влажных равнинах Мещеры. Минимумы индекса NAO определяют повышенную частоту зимних похолоданий и дефицит увлажнения.

«Переходные» периоды (годы, соответствующие нисходящей (1950-е, 2000-е гг.) или восходящей (1980-е гг.) ветви NAO) маркируются повышенными приростами (рис. 2).

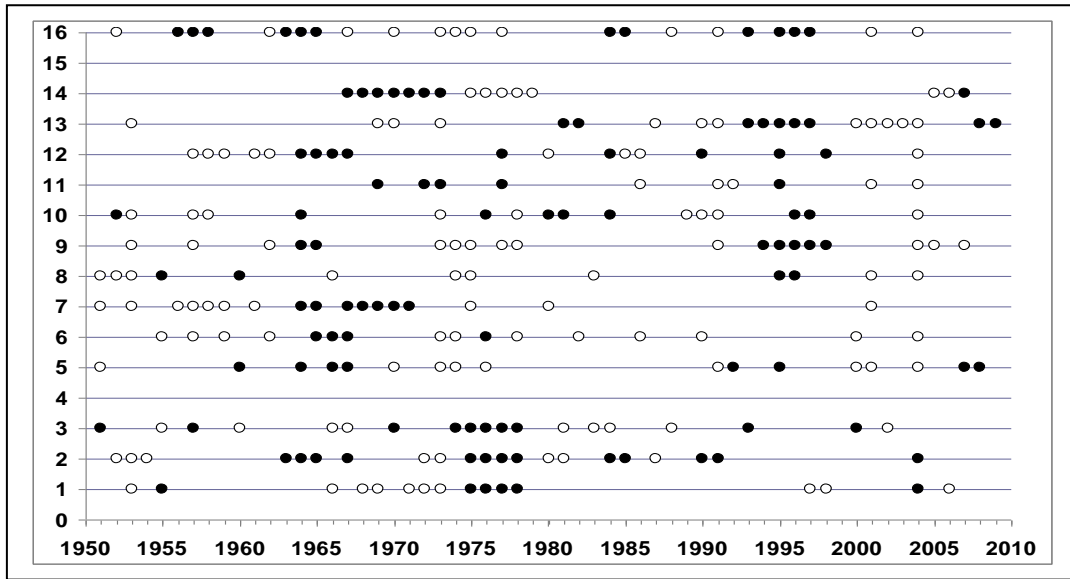


Рисунок 2 – Положительные (белый кружок) и отрицательные (черный кружок) реперные годы для местообитаний Южной Мещеры в 1951-2009 гг.

Примечание. По оси у – номера точек отбора кернов и спилов сосны: 1-3 – останцовые массивы московского возраста; 5-6 – песчаные положительные формы рельефа в пределах влажных равнин; 7-11 – влажные и сырые песчаные равнины; 12-16 – болота

**В пятой главе «Тяжелые металлы и радионуклиды в фитомассе лесных экосистем Южной Мещеры»** рассматриваются закономерности транспорта ТМ и РН в системе растительных органов и барьерные механизмы аккумуляции элементов в фитомассе. Анализ коэффициентов транслокации (TF) и рядов относительного распределения ТМ во фракциях биомассы деревьев показал, что для биофильных Cu и Zn характерна повышенная аккумуляция в надземных органах, а для токсичного Cd – в тканях корней. Широкая субстратная специфичность транспортеров в корневых системах сменяется повышением селективности биопоглощения ТМ в надземных органах. Выявлена видовая специфика аккумуляции ТМ: активное поглощение Zn и Cd гумидокатными видами (березой и осинкой), накопление Cu ариданитным дубом, повышенная чувствительность к ТМ ели, накопление Cd в листьях осины ( $TF > 1$ ), связанное, по-видимому, с повышенными концентрациями глутатиона – важного хелатора Cd (Österås A.H., 2004; Liu W. et al., 2013; Титов А.Ф. и др., 2014) – в ксилемном соке растений рода *Populus* (Schneider A. et al., 1994).

Анализ коэффициентов дискриминации (DF) Zn/Cd показал, что типичным органом, выполняющим барьерную функцию в отношении Cd, является древесина ствола ( $DF = 0,44-2,62$ ). Повышенная аккумуляция Cd в древесине обусловлена его миграцией в ксилемном соке преимущественно в форме свободного иона  $Cd^{2+}$  (Conn

S., Gilliam M., 2010; Hazama K. et al., 2015), тогда как значительная доля Zn перемещается в комплексе с лигандами (Sinclair S.A., Kramer U., 2012; Bouain N. et al., 2014), что предотвращает его связывание с компонентами клеточных стенок ксилемы. Повышенная аккумуляция Cd в древесине хвойных пород ( $DF = 0,44-0,68$ ) обусловлена дополнительной ионообменной емкостью карбоксильных групп смоляных кислот (Österås A.H., 2004).

Установлено, что  $^{137}\text{Cs}$ , в отличие от  $^{40}\text{K}$ , накапливается во фракциях подземной фитомассы ( $DF^{40}\text{K}/^{137}\text{Cs} < 1$ ), что связано с селективностью выходных и входных ионных каналов клеток, окружающих сосуда ксилемы. Повышенная аккумуляция  $^{137}\text{Cs}$  в надземной фитомассе (гипераккумуляция) характерна для зеленых мхов (роды *Polytrichum*, *Dicranum*, *Pleurozium*) и папоротника орляка обыкновенного (*Pteridium aquilinum*) – древних организмов с отсутствием барьерных тканей (Ковалевский А.Л., 2010) и слабой селективностью К-транспортных механизмов, а также для вереска (*Calluna vulgaris*), листьев и тонких ветвей дуба, осины, березы. Установлено, что растения, гипераккумулярующие  $^{137}\text{Cs}$ , должны удовлетворять следующим условиям:

1. Интенсивно поглощать  $^{137}\text{Cs}$  посредством транспортных систем корня. Данное условие выполняется в случае функционирования в корнях растений неспецифического типа К-транспортной системы, LATS (*low-affinity transport systems*) (Wiesel L., 2010; Coskun D. et al., 2015). LATS, обладая низким сродством к иону, активно поглощают не только К, но и его геохимические аналоги, в том числе  $^{137}\text{Cs}$ . LATS функционируют в корнях растений в условиях высокой концентрации ионов в окружающей среде.

2. Интенсивно транслоцировать  $^{137}\text{Cs}$  в надземные органы. Данное условие выполняется в случае пониженной избирательности транспорта элементов на этапах загрузки в ксилему и поступления в фотосинтезирующие органы.

3. Иметь эффективные механизмы детоксикации  $^{137}\text{Cs}$  в побегах, возможно, по аналогии с Na (Schroeder J.I. et al., 2013), за счет образования метаболически инертного вакуолярного пула.

Установлено, что данным условиям соответствуют растения, активно питающиеся нитратным азотом и восстанавливающие его в фитомассе надземных органов. На рис. 3 представлена схема механизма гипераккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  растениями, в основе которой лежат физиологические аспекты азотного и калийного питания растений.

Согласно предложенному нами механизму гипераккумуляции  $^{137}\text{Cs}$ , такие аспекты физиологии, как корневое поглощение  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{K}^+$ , восстановление  $\text{NO}_3^-$  в надземной фитомассе, образование избыточных количеств органических кислот в побегах и гипераккумуляция  $^{137}\text{Cs}$  являются звеньями единого процесса –



интенсивного нитратного питания растений. Такое питание характерно как для ариданитных видов (дуба, представителей семейств амарантовые (*Amaranthaceae*), маревые (*Chenopodioideae*), сложноцветные (*Asteraceae*)), активно поглощающих анионогенные элементы, в том числе  $\text{NO}_3^-$ , так и для гумидокатных пионерных растений (осины и березы), характеризующихся высокой нитратредуктазной активностью в листьях. Предложенный нами механизм гипераккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  может помочь в выборе видов - фиторемедиантов почв, загрязненных данным радионуклидом, и объясняет все известные на сегодня случаи гипераккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  растениями.

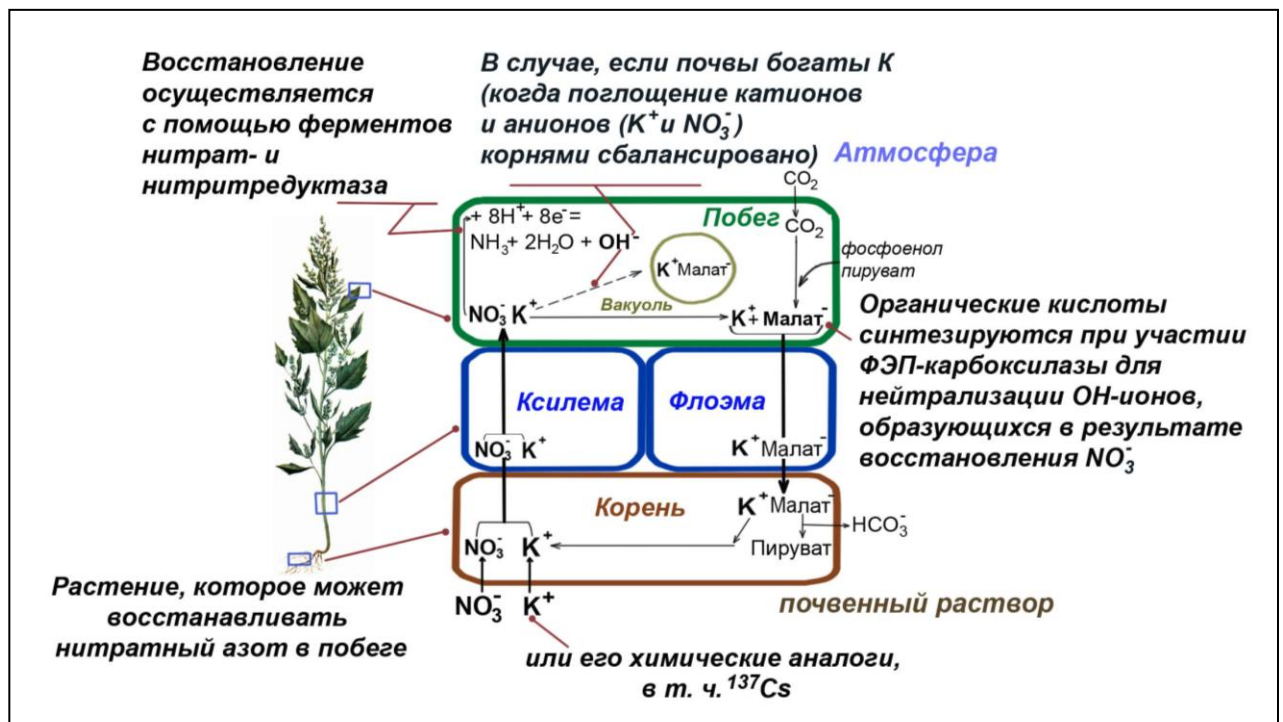


Рисунок 3 – Схема механизма гипераккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  растениями

**В шестой главе «Потенциал биотического блока лесных экосистем по иммобилизации и мобилизации тяжелых металлов и радионуклидов»** приводятся значения запасов элементов в фитомассе и их ежегодного вовлечения в продукционные процессы, карты-схемы показателей биогенной миграции ТМ и их баланс в лесных экосистемах Южной Мещеры.

Установлено, что долговременная иммобилизация ТМ в ежегодном приросте тканей ствола (древесины и коры) составляет 5,5-7,5% от величины суммарной ежегодной фиксации ТМ в приросте всех основных компонентов фитоценоза (табл. 2). Иммобилизация в стволах деревьев является важнейшим источником естественной биогеохимической буферности экосистем к потенциальному загрязнению, поскольку обеспечивает долговременное изъятие элементов из миграции и их вероятное последующее отчуждение при рубках. В целом – на фоне рециклической миграции – такая иммобилизация невелика: циклические потоки ТМ,

связанные с обновлением листвы, хвои и тонких корней древесного яруса, в 6,8 (Cd) – 11,3 (Zn) раза масштабнее. Потоки ТМ, ассоциированные с подлеском, травяно-кустарничковым и мохово-лишайниковым ярусами, в 4,5-5,5 раза масштабнее ежегодной иммобилизации ТМ в тканях ствола. Аккумуляция ТМ в ежегодно нарастающем слое торфа, которая также представляет собой долговременное изъятие элементов из миграции, составляет 11-20% от их иммобилизации в стволе (табл. 2).

Таблица 2 – Биологическая продуктивность лесных экосистем Южной Мещеры и вовлечение тяжелых металлов в продукционные процессы

Ярусы, фракции фитомассы		Прирост, <i>т/га×год (1) и % (2)</i>		Тяжелые металлы в продукции, г/га×год (1) и % (2)					
				<i>Cu</i>		<i>Zn</i>		<i>Cd</i>	
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>2</i>
Древесный ярус	<b>Надземная часть</b>	<b>3,740</b>	<b>44,9</b>	<b>18,382</b>	<b>40,4</b>	<b>208,084</b>	<b>46,5</b>	<b>1,148</b>	<b>29,6</b>
	<i>в т.ч. в древесине и коре ствола</i>	1,451	17,5	2,762	6,1	24,916	5,5	0,287	7,4
	<i>в т.ч. в хвое и листьях</i>	1,606	19,3	11,769	25,9	165,927	37,0	0,591	15,2
	<b>Подземная часть</b>	<b>2,374</b>	<b>28,5</b>	<b>11,328</b>	<b>24,7</b>	<b>121,662</b>	<b>27,2</b>	<b>1,407</b>	<b>36,3</b>
	<i>в т.ч. в тонких корнях</i>	2,152	25,9	10,683	23,5	116,476	26,0	1,347	34,7
Подлесок, травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы		2,086	25,1	15,288	33,6	115,354	25,8	1,279	33,0
Средняя аккумуляция в ежегодно нарастающем слое торфа (0,218 мм)		0,121	1,5	0,563	1,2	2,811	0,6	0,046	1,2
<b>Итого по фитоценозу</b>		<b>8,320</b>	<b>100</b>	<b>45,471</b>	<b>100</b>	<b>447,911</b>	<b>100</b>	<b>3,880</b>	<b>100</b>

Для рассматриваемых ТМ построены картосхемы их общих запасов в фитомассе (рис. 4), ежегодной иммобилизации в стволах и в комле, рецикличной миграции и аккумуляции растущим торфом. Анализ картосхем показал, что пространственные различия в потенциале геохимической устойчивости экосистем к загрязнению определяются комплексом факторов: видовым составом растительности, геохимической специализацией видов, барьерными механизмами аккумуляции элементов, уровнем биопродуктивности древостоя, долей антропогенно нарушенных земель и в целом контролируются ландшафтной структурой территории.

Максимальная емкость и интенсивность круговоротов Cu (в 2 раза выше средних значений) приурочена к высокопродуктивным сосновым ценозам останцовой песчаной местности I – локального оптимума монодоминантных сосняков (рис. 4а). Это связано с повышенной аккумуляцией Cu, тесно ассоциированной с почвенной органикой (Ладонин Д.В., Марголина С.Е., 1997) и мигрирующей в основном в составе отрицательно заряженных органоминеральных комплексов, в ариданитных видах, в т.ч. в древесине ариданитной сосны.

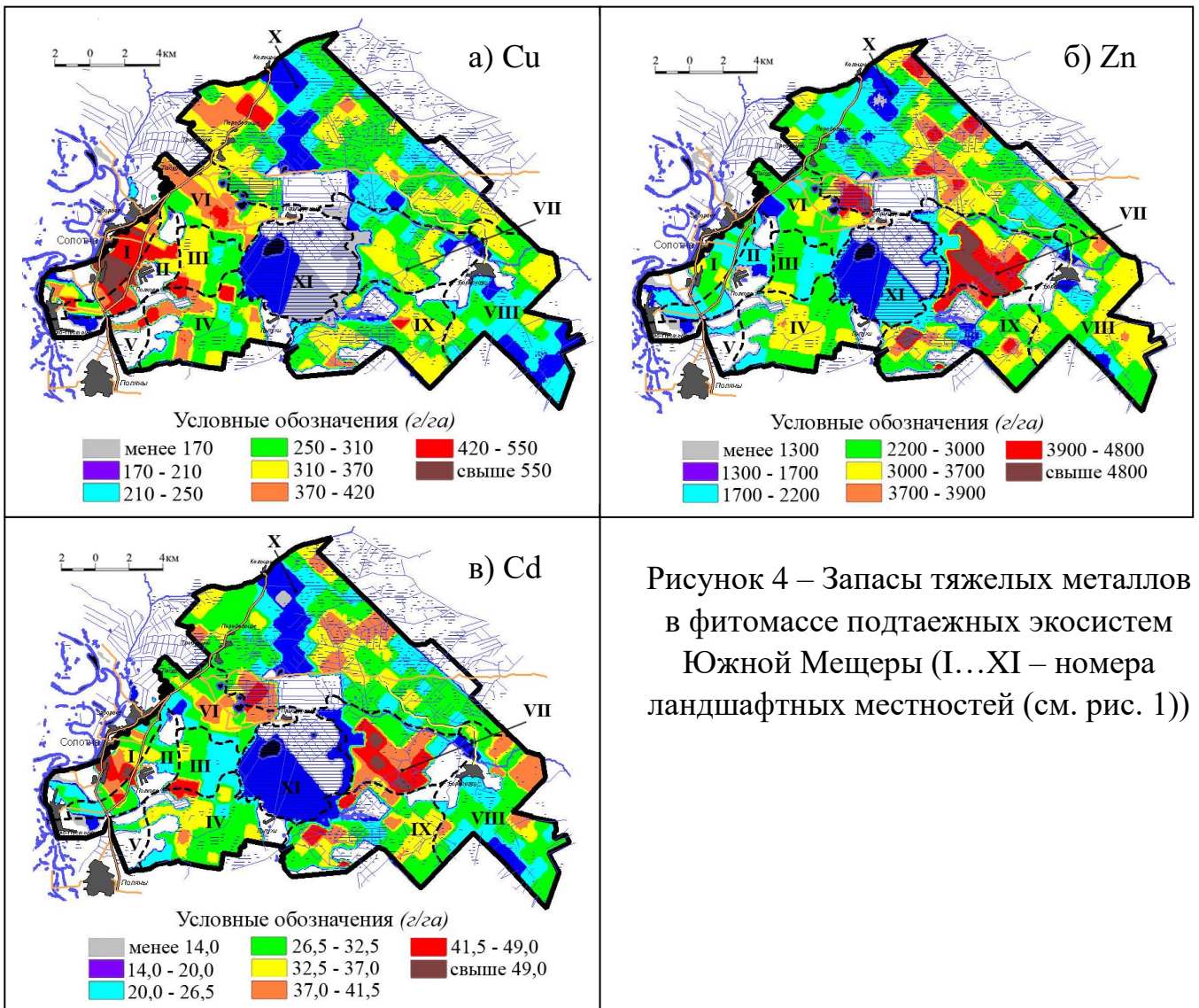


Рисунок 4 – Запасы тяжелых металлов в фитомассе подтаежных экосистем Южной Мещеры (I...XI – номера ландшафтных местностей (см. рис. 1))

При преобладании гумидокатных видов (местность VII) интенсивность биогенной миграции Cu падает до средних значений, в то время как биокруговороты Zn и Cd, напротив, достигают максимальной емкости и интенсивности (за счет активной аккумуляции данных ТМ березой и осиной) (рис. 4б, в). Сниженные масштабы биокруговоротов всех ТМ характерны для заболоченных территорий и связаны с общей низкой продуктивностью древостоев в условиях грунтового переувлажнения. Потенциал устойчивости экосистем к химическому загрязнению существенно понижается за счет антропогенных пустошей, составляющих 5% от общей площади земель Солотчинского лесхоза. Из-за отсутствия древесной растительности пустоши характеризуются нулевыми значениями геохимической устойчивости, определяемой масштабами иммобилизации ТМ в тканях ствола.

Балансовые расчеты показали, что в экосистемах Южной Мещеры Zn является слабodefицитным элементом (невязка баланса равна -5,1%), а Cu и Cd – избыточными (невязка балансов равна +20,4% и +55,7%, соответственно) (рис. 5).

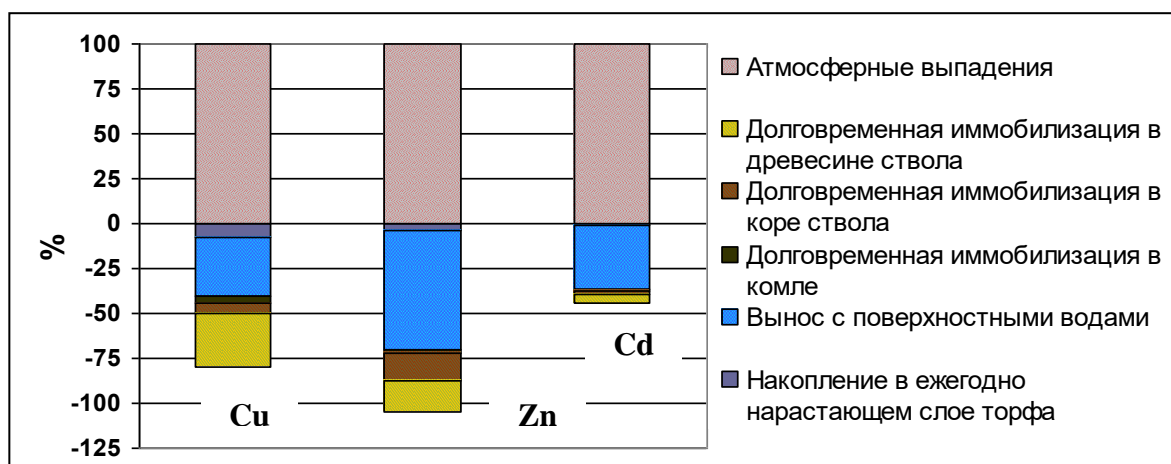


Рисунок 5 – Баланс тяжелых металлов в лесных экосистемах Южной Мещеры

Главной причиной дефицитности Zn – типоморфного элемента кислых гумидных ландшафтов – является его активная миграция в водной среде и, как следствие, повышенный водный вынос. Как следует из рис. 5, биотический блок подтаежных экосистем способен иммобилизовать 39-46% атмосферных выпадений биофильных элементов – Zn и Cu – и менее 10% атмосферной поставки токсичного Cd (за счет аккумуляции в приросте древесины, коры стволов, тканей комля, а также накопления в ежегодно нарастающем слое торфа).

Согласно полученным данным, в биотическом блоке ключевого участка (выделы 18 и 27 квартала №70 Борисковского лесничества) удерживается 2,05 ( $^{40}\text{K}$ ) - 2,20% ( $^{137}\text{Cs}$ ) от суммарной радиоактивности экосистемы, еще 0,11 ( $^{40}\text{K}$ ) - 1,85% ( $^{137}\text{Cs}$ ) ассоциировано с лесной подстилкой. Основным источником радиоактивности является почва (до 96-98% суммарной активности). Сравнение запасов РН в биоблоке с их ежегодной рециклической миграцией показывает, что ежегодно обновляется 21% ( $^{137}\text{Cs}$ ) - 25% ( $^{40}\text{K}$ ) запасов радиоактивных элементов в биоблоке. Это существенно выше, чем для ТМ, причем не только для токсичного Cd (11,5%), но и для биофильных Cu и Zn (14-15%). При этом долговременная иммобилизация  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  в тканях стволов составляет соответственно 2,25% и 1,31% от величины их суммарной ежегодной фиксации в приросте всех основных компонентов фитоценоза (в среднем в 5 раз меньше, чем для ТМ). Циклические потоки  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$ , связанные с обновлением листвы, хвои и тонких корней деревьев, соответственно в 27 и 44 раза масштабнее их иммобилизации в стволах. На долю нижних ярусов приходится 26-31% от суммарного ежегодного вовлечения РН в продукционные процессы, что в целом аналогично ТМ. Таким образом, крайне низкий иммобилизационный потенциал тканей ствола в отношении радиоцезия и существенные масштабы его рециклической миграции отличают  $^{137}\text{Cs}$  от ТМ и не могут считаться благоприятным для обеспечения биогеохимической устойчивости подтаежных экосистем к данному РН.

## ВЫВОДЫ

1. Запасы биомассы сосны (*P. sylvestris*) в Южной Мещере выше зональной возрастной нормы ( $K_b = 1,04$ ), остальных древесных пород – ниже нормы ( $K_b < 1$ ). Сосняки формируют высокобонитетные сообщества на супесчаных почвах умеренной влажности (В2;  $K_b$  до 1,1), береза (*B. pendula*) и другие породы – в условиях более трофных и влажных эдактопов (В3 и С3;  $K_b$  до 0,85). Минимальная биопродуктивность древостоев характерна для мокрых и сырых боров и суборей (А5, В5, В4, А4;  $K_b = 0,3-0,5$ ).

2. Выделенные в пределах района исследований ландшафтные местности отличаются современным рельефом, историей развития, дренированностью и структурой растительного покрова. Минимальные приросты древостоев (50-60% от зонального среднего) приурочены к доплейстоценовым эрозионным врезам с неразвитой дренажной сетью и заболачиванием, максимальные (до 1,5 раз выше зонального среднего) – к вершине погребенного доверхнеюрского известнякового останца. Из-за высокой плотности известняка (в 1,20–1,33 раза выше, чем у иных пород на территории), его локальные выступы – даже несмотря на их древность и значительную глубину залегания – формируют положительные гравитационные аномалии, стимулирующие водообмен и снижающие эффект переувлажнения.

3. Средний прирост по диаметру сосны (*P. sylvestris*) из контрастных топоэкологических условий различается в 2,5 раза (1,5-3,9 мм/год), причем лимитировать прирост могут как дефицит влаги (на останцовых песчаных массивах), так и переувлажнение (в условиях болот и влажных равнин). В переувлажненных местообитаниях наблюдается положительная корреляция прироста с температурой и отрицательная – с осадками осени предыдущего года; в засушливых – положительная корреляция с осадками осени, мая и с температурой зимы. Отрицательная связь прироста с количеством осадков в условиях болот может проявляться с лагом 1-4 года.

4. Максимальные (1-ая половина 1990-х гг.) и минимальные (1996 г., 1960-е гг.) значения индекса Североатлантического колебания (NAO) неблагоприятны для прироста сосны (*P. sylvestris*) в Южной Мещере. При этом факторами, лимитирующими прирост, являются переувлажнение (для максимумов NAO – за счет мягких влажных зим) и дефицит осадков (для минимумов NAO). Годы, соответствующие нисходящей (1950-е, 2000-е гг.) или восходящей (1980-е гг.) ветви NAO, маркируются повышенными приростами.

5. К наиболее общим закономерностям распределения ТМ в биомассе древесных пород относятся: 1) активная транслокация Cu и Zn в надземные органы и повышенная аккумуляция Cd в тканях корней; 2) повышение селективности

биопоглощения в направлении: корни < тонкие ветви < листья, что связано с необходимостью защиты фотосинтетического аппарата от токсичных ТМ; 3) накопление в древесине Cd в связи с его ксилемным транспортом преимущественно в форме свободного иона  $Cd^{2+}$ ; 4) повышенная аккумуляция в древесине Cu, связанная с ее важной ролью в лигнификации ксилемы и высоким сродством к материалу клеточных стенок. Указанные закономерности варьируют в зависимости от видовой специфики растений.

6.  $^{137}Cs$  и  $^{40}K$  контрастно распределены в фитомассе надземных и подземных органов: биофильный  $^{40}K$  активно поступает в побег, а транслокация токсичного  $^{137}Cs$  ограничена корневым барьером. Общий характер распределения  $^{137}Cs$  и  $^{40}K$  по фракциям надземной биомассы деревьев в целом аналогичен (листья (хвоя) > тонкие ветви > кора > древесина).

7. Впервые предложено объяснение механизма гипераккумуляции (повышенного накопления в надземной биомассе)  $^{137}Cs$  растениями. Гипераккумуляторы  $^{137}Cs$  интенсивно питаются нитратным азотом и восстанавливают его в надземных органах. Такое питание характерно как для ариданитных видов – дуба (*Q. robur*), представителей семейств амарантовые (*Amaranthaceae*), маревые (*Chenopodioideae*), сложноцветные (*Asteraceae*), активно поглощающих анионогенные элементы (в том числе  $NO_3^-$ ), так и для гумидокатных пионерных видов (осины (*P. tremula*) и березы (*B. pendula*)), характеризующихся быстрыми темпами роста и высокой нитратредуктазной активностью в листьях.

8. Долговременная иммобилизация элементов в ежегодном приросте древесины и коры ствола – важнейший источник буферности экосистем к загрязнению – составляет лишь 5,5-7,5% (для ТМ) и 1,3-2,3% (для РН) от их суммарной ежегодной фиксации в приросте всех компонентов фитоценоза. Циклические потоки элементов, связанные с обновлением листвы, хвои, тонких корней древесного яруса и биомассы нижних ярусов, в 11-16 раз (для ТМ) и в 39 ( $^{137}Cs$ ) - 67 ( $^{40}K$ ) раз масштабнее. Биотический блок подтаежных экосистем способен иммобилизовать (за счет накопления в древесине, коре стволов и торфяных аккумуляций) 39-46% атмосферных выпадений биофильных Zn и Cu и менее 10% токсичного Cd.

9. Пространственные различия в потенциале геохимической устойчивости экосистем к загрязнению определяются комплексом факторов: видовым составом растительности, геохимической специализацией видов, барьерными механизмами аккумуляции элементов, уровнем биопродуктивности, долей антропогенно нарушенных земель. Расчет баланса ТМ свидетельствует о дефицитности в экосистемах Южной Мещеры Zn (повышенный водный вынос) и выраженной избыточности Cd (почти нулевая биофильность).

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ (17)

### В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Железнова, О.С.** Оценка пространственно-временных закономерностей прироста сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) в подтаежных сообществах Мещеры (по материалам дендрохронологических исследований) / О.С. Железнова, Н.А. Черных, С.А. Тобратов // Вестник РУДН. Серия «Экология и безопасность жизнедеятельности». – 2015. – №4. – С. 15-27.

2. Accumulation of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$  by Plants of Forest Ecosystems: The Estimation of Plant Species Factor. Case Study: Mixed Forests of the East European Plain / **O.S. Zheleznova**, N.A. Chernykh, V.A. Grachev, Y.I. Baeva, S.A. Tobratov // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – Vol. 7, №6. – P. 547-560.

3. Tobratov, S.A. Critical Loads-Based Ecological Control of Heavy Metal Deposition in Natural and Anthropogenic Ecosystems: Trial Study / S.A. Tobratov, **O.S. Zheleznova**, V.A. Krivtsov // International Journal of Biology, Pharmacy and Allied Sciences. – 2016. – Vol. 5, №11. – P. 3013-3028.

4. **Железнова, О.С.** Цинк и кадмий в фитомассе древесных растений лесных экосистем: закономерности транслокации, аккумуляции и барьерных механизмов / О.С. Железнова, Н.А. Черных, С.А. Тобратов // Вестник РУДН. Серия «Экология и безопасность жизнедеятельности». – 2017. – Т. 25, №2. – С. 253-270.

### В других изданиях:

5. Тобратов, С.А. Пространственные закономерности дифференциации радионуклидов в ландшафтах Рязанской области и их индикационное значение / С.А. Тобратов, **О.С. Железнова** // Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. – 2012. – № 4/37. – С. 151-173.

6. Тобратов, С.А. Факторы и пространственно-временные закономерности биологической продуктивности лесных фитоценозов на примере Рязанской Мещеры / С.А. Тобратов, **О.С. Железнова** // Итоги диссертационных исследований. Т. 1. Материалы V Всероссийского конкурса молодых ученых. – М.: РАН, 2013. – С. 59-73.

7. Тобратов, С.А. Биологическая продуктивность лесных сообществ Рязанской Мещеры в условиях климатической динамики: пространственно-временной аспект / С.А. Тобратов, **О.С. Железнова** // Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. – 2014 г. – №2/43. – С. 142-159.

8. Тобратов, С.А. Дендроклиматический анализ прироста дуба черешчатого (*Quercus robur*) в подтаежных экосистемах Мещерской низменности / С.А. Тобратов, **О.С. Железнова** // Материалы международной научно-практической конференции «World & Science». – Брно, 2014. – С. 109-119.

9. Тобратов, С.А. Ландшафтно-геохимический подход в выявлении фоновых и аномальных концентраций тяжелых металлов в почвах (на примере центра Восточно-Европейской равнины) / С.А. Тобратов, **О.С. Железнова** // Материалы Международной конференции «Актуальные проблемы развития мировой науки». – Киев, 2015. – С. 96-100.

10. Tobratov, S.A. Abandoned Land as a Factor of Landscapes Resistance to Anthropogenic Mercury Deposition / S.A. Tobratov, **O.S. Zheleznova** // Proceeding of Interdisciplinary Workshop «Potential of idle agricultural lands of the post-soviet area to mitigate the climate changes and improve an environment». – Pushchino, 3-5 March, 2015. – P. 53-55.

11. **Zheleznova, O.S.** Dendroclimatic Analysis of the Tree Growth in Meschera Ecosystems in the Era of Global Warming / O.S. Zheleznova, S.A. Tobratov // People. Science. Innovations in the new millennium. Proceedings of the International Youth Scientific Conference. Part 1. – Moscow, 23-25 November, 2015. – P. 356-363.

12. **Железнова, О.С.** К вопросу о механизме гипераккумуляции радиоцезия растениями лесных экосистем центра Русской равнины / О.С. Железнова, С.А. Тобратов, Н.А. Черных // Материалы Всероссийской научной конференции «Геохимия ландшафтов» (к 100-летию А.И. Перельмана). – Москва, 18-20 октября, 2016. – С. 208-212.

13. Тобратов, С.А. Пирогенная и биогенная трансформация микроэлементного состава зольной части торфа (на примере Мещерской низменности) / С.А. Тобратов, **О.С. Железнова** // Материалы Всероссийской научной конференции «Геохимия ландшафтов» (к 100-летию А.И. Перельмана). – Москва, 18-20 октября, 2016. – С. 589-592.

14. Тобратов, С.А. Оценка пространственных закономерностей лесорастительного потенциала территории на основе «коэффициентов благоприятности» (на примере смешанных лесов Восточно-Европейской равнины) / С.А. Тобратов, **О.С. Железнова**, А.В. Водорезов // Восточно-Европейский научный журнал. – 2016. – Т. 8, №5. – С. 127-133.

15. **Zheleznova, O.S.** Retranslocation of Foliar Heavy Metals (Cu, Zn, Cd) in Tree Species during Autumnal Leaf Senescence (Example of Subtaiga Forests of the East European Plain) / O.S. Zheleznova, N.A. Chernykh, S.A. Tobratov // Environmental problems of the third millennium. Proceedings of the International Youth Scientific Conference. – Moscow, 25-26 November, 2016. – P. 31-42.

16. **Железнова, О.С.** Иммобилизационный потенциал биотического блока лесных экосистем центра Восточно-Европейской равнины в отношении цинка и кадмия / О.С. Железнова // Биология – наука XXI века: 21-я Международная Пушинская школа-конференция молодых ученых. – Пушино, 17-21 апреля, 2017. – С. 283.

17. **Zheleznova, O.S.** Radiocesium Hyperaccumulation by Plants as the Basis for Their Use in Phytoremediation of Soil Contaminated with Radionuclides / O.S. Zheleznova, N.A. Chernykh, S.A. Tobratov // 9th international congress «Soils of Urban Industrial Traffic Mining and Military Areas». – Moscow, 22-26 May, 2017. – P. 485-487.



Железнова Ольга Сергеевна (Российская Федерация)

**Комплексная оценка биогеохимической устойчивости экосистем в условиях техногенеза (на примере подтаежных лесов Южной Мещеры)**

Работа посвящена изучению закономерностей биогенной миграции тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd) и радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) в лесных экосистемах Южной Мещеры. Анализируются факторы, определяющие потенциал геохимической устойчивости экосистем: видовой состав растительности, геохимическая специализация видов (гумидокатность, ариданитность, гипераккумуляция ТМ и  $^{137}\text{Cs}$ ), барьерные механизмы аккумуляции элементов, уровень биопродуктивности древостоя, доля антропогенно нарушенных земель. На основе балансовых оценок дан анализ поведения элементов на экосистемном уровне, выявлены дефицитные и избыточные элементы. Установлена связь биопродуктивности древостоя с особенностями коренных пород, рельефа местности, почвенного покрова, климатической динамики. Проанализированы пространственные закономерности запасов фитомассы, аномалий прироста древостоя и показателей биогенной миграции.

Zheleznova Olga Sergeevna (Russian Federation)

**Complex assessment of biogeochemical ecosystem stability in the conditions of technogenesis (on the example of subtaiga forests of the South Meshchera)**

The scientific work is devoted to regularities in the biogenic migration of heavy metals (Cu, Zn, Cd) and radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) in the forest ecosystems of the South Meshchera. Factors that determine the potential of geochemical ecosystem stability have been analyzed (species composition of the vegetation, the geochemical specialization of the species (humidokite and aridanite species, hyperaccumulation of heavy metals and radionuclides), barrier mechanisms of element accumulation, level of the forest biological productivity, the proportion of anthropogenically disturbed land). On the basis of balance method the behavior of elements at the ecosystem level has been analyzed, deficit and surplus chemical elements have been identified. The relation of the forest productivity with the climatic dynamics and characteristics of bedrock, topography, soil has been established. Spatial patterns of phytomass reserves, anomalies of the tree growth and indicators of biogenic migration have been analyzed.