

На правах рукописи

Шарая

ШАРАЯ ЛАРИСА СТАНИСЛАВОВНА

**ПРОГНОЗНОЕ ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ
КАРТОГРАФИРОВАНИЕ
(МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ)**

Специальность 03.02.08 – экология (биология)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Тольятти – 2017

Работа выполнена в лаборатории ландшафтной экологии
Института экологии Волжского бассейна Российской академии наук

- Научный консультант:** **Коломыц Эрланд Георгиевич**,
доктор географических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий лабораторией ландшафтной экологии
ИЭВБ РАН (г. Тольятти)
- Официальные оппоненты:** **Чибилёв Александр Александрович**,
академик РАН, доктор географических наук,
профессор, директор Института степи УрО РАН,
(г. Оренбург)
Петрова Людмила Николаевна,
академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук,
профессор, заслуженный деятель науки РФ,
главный научный сотрудник Ставропольского государственного аграрного университета (г. Ставрополь)
Абакумов Евгений Васильевич,
доктор биологических наук, профессор, заведующий
кафедрой прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного университета (г. Санкт-Петербург)
- Ведущая организация:** **Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Московский государственный университет леса)** (г. Мытищи)

Защита диссертации состоится **30 мая 2017 г. в 11⁰⁰ часов** на заседании диссертационного совета Д 002.251.02 на базе Института экологии Волжского бассейна Российской академии наук по адресу: 445003, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Комзина, 10. Тел. 8 (8482) 48-99-77

Диссертационный совет Д 002.251.02 при ИЭВБ РАН: тел. 8 (8482) 48-95-76;
E-mail: dissovetievb@mail.ru

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Института экологии Волжского бассейна РАН и на сайте ИЭВБ РАН по адресу: www.ievbras.ru на официальном сайте ВАК vak.ed.gov.ru

Автореферат разослан « ____ » « _____ » 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Л. Маленёв

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Разработка методов расчета прогнозных карт лесных экосистем и агроландшафтов связана в первую очередь с глобальным изменением климата. Мелкомасштабные (глобальные) модели и карты (Aber et al., 2001; Tatsumi et al., 2011; Жильцова, Анисимов, 2013; Huang, 2016 и др.) имеют большую неопределенность в прогнозах, а заложенные в них принципы нередко меняются с обнаружением новых тенденций на более крупных масштабах (McGuire et al., 2009). Кроме того, решения по адаптации лесного и сельского хозяйств принимаются на уровне стран или крупных административных образований, а не глобально (Scheller, Mladenoff, 2005). В этой связи необходимы средне- и крупномасштабные прогнозныe карты на базе более объективных моделей, оперирующих ограниченным числом характеристик растительности и выявленных связей (Zeide, 1999; Guisan, Zimmermann, 2000).

На картах крупных (~ 1:50 000) и средних масштабов действие меняющегося климата на растительность требует учета рельефа, существенно влияющего на гидротермические, радиационные и эдафические условия (Коломыц, 2008; Лукина и др., 2015). Описание рельефа требовало представительного набора характеристик. Эта проблема в значительной мере решена введением расширенной системы 18 базовых количественных характеристик рельефа, для каждой из которых описан смысл в терминах ландшафтных процессов и явлений (Shary et al., 2002), что обеспечило ландшафтно-экологический подход новым пулом абиотических факторов для анализа.

Изучению связей внутри лесных экосистем посвящен впечатляющий ряд исследований отечественной школы ландшафтоведения (Сочава, 1975; Крауклис, 1979; Исаченко, 2001 и др.). Разрабатывались также методы прогнозного картографирования, в том числе геоботанического (Жуков и др., 1980; Киселев, 1985 и др.). Однако составление прогнозных карт, основанных на изученных связях, оставалось затруднительным из-за недостаточной разработанности корректных методов отражения выявленных закономерностей. В крупномасштабном картографировании возник ряд специфических проблем методологического характера, таких как выбор общего подхода к моделированию, проблема верификации моделей, учет катенарной сопряженности в экосистемах, совместного действия зависимых факторов и т.д. Хотя в последние годы предпочтение отдается моделям, основанным на статистическом сравнении изучаемых биотических характеристик с факторами окружающей среды (Guisan, Zimmermann, 2000; Maggini et al., 2006; Sharaya, Shary, 2011 и др.), вместо основанных на процессах моделей (роста деревьев и др.), проблема развития и эффективности методов оставалась недостаточно изученной.

Цель исследования – сформировать принципы, подходы и методы крупно- и среднemasштабного картографирования прогнозируемых преобразований экосистем в связи с изменением климата, изучить с их помощью закономерности изменения экосистем.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Проанализировать известные в литературе методы прогнозного картографирования, дать критическую оценку.
2. Найти общий способ расчета моделей и карт ландшафтных сопряжений типов местоположений для использования их в качестве пространственного предиктора, предварительно модифицировав подход, и оценить их вклад в модели.
3. Разработать методы расчета крупномасштабных карт прогнозируемых влагозапасов и температур почв.
4. Изучить возможные подходы для расчета крупномасштабных карт прогнозируемых функциональных и структурных характеристик лесных экосистем.
5. Оценить возможность использования индексов устойчивости в прогнозных картографических моделях, модифицировав их расчет. Сравнить характер связи индексов с направлением и глубиной климатогенных изменений в лесных экосистемах из разных природных зон.
6. Предложить метод формирования прогнозной региональной карты баланса суммарного углерода в лесных экосистемах при использовании идеи подобия катен, бассейновой модели типов местоположений, геоботанической карты и метаболических показателей.
7. Изучить роль мезорельефа при прогнозном картографировании региональных агроландшафтов, найти корректный способ введения взаимозависимых климатических показателей в прогнозные модели.

Научная новизна.

1. Предложена модифицированная система типов местоположений, обобщающая известную катенарную систему учетом изменений склонов не только в профиле, но и в плане, а также учетом терморежима склонов. Это позволило использовать модифицированные типы местоположений в качестве одного из ведущих факторов среды для прогнозного картографирования функциональных и структурных состояний лесных экосистем.
2. Предложено и апробировано в картографировании прогнозируемых метаболических показателей экосистем использование моделей и карт: (а) прогнозируемых гидротермических характеристик, (б) базовых показателей метаболизма, (в) количественных показателей устойчивости.
3. Проведена модификация расчета количественных показателей упругой и резистентной устойчивости для двух лесных экосистем из разных природных зон путем введения весовых коэффициентов при измеренных скоростях процессов синтеза и деструкции. Выявлено, что эти показатели могут являться ведущими факторами для расчета прогнозных карт, и могут выступать индикаторами будущих преобразований экосистем.
4. Показана возможность формирования подробной региональной карты баланса суммарного углерода в лесных экосистемах при использовании подобия катенарных ря-

дов близких иерархических уровней, типов мезоместоположений, метаболических показателей плакорно-экстразонального ряда для различных геоботанических ареалов. Выявлена резкая мозаичность такой карты, изучена позитивная и негативная роль отдельных подсистем бассейна в балансе углерода бассейна.

5. Показано, что для построения региональных прогнозных карт урожайности озимой пшеницы важен учет мезорельефа, наряду с климатом. Предложено использование метода, в котором совместное влияние температур и осадков выражено функцией от них, отражающей важную для урожая хронологическую последовательность их действия, так как тесная связь между ними не допускала введения их в регрессионную модель.

Теоретическая значимость работы. Разработаны методы крупно- и среднемасштабного ландшафтно-экологического прогнозного картографирования на основе представительного описания рельефа, учета типов местоположений и модифицированных показателей устойчивости экосистем, использования параметров их текущего состояния и повторяющейся во времени смены климатических показателей. Показаны возможности методов расчета прогнозных карт и даны примеры их построения, в том числе допускающие частичную проверку.

Практическая значимость работы. В практике лесного и сельского хозяйства решения в связи с изменением климата принимаются на основе карт масштаба стран или крупных административных образований, а не глобального. Для их построения была недостаточно развита методология, поэтому прогнозных карт этих масштабов практически не было. Для их построения необходима детальная ландшафтная основа. В качестве такой основы для расчета прогнозных карт предложены доступные сегодня матрицы рельефа высокого разрешения по спутниковым данным и матрицы климатических показателей. Разработанные методы прогнозного картографирования позволяют строить такие карты с использованием этих данных и наземных измерений.

Приведенный в работе метод использования в качестве факторов климата, рельефа и типов почв позволяет создавать среднемасштабные карты прогнозируемой урожайности, которые важны для эффективного планирования посевных площадей и выбора перспективных сельскохозяйственных культур.

Методы исследования. В основе лежат выражающиеся картами модели нелинейной множественной регрессии, а также использование эмпирически найденных зависимостей структурных и метаболических показателей экосистем от прогнозируемых локальных гидротермических условий, отражающих изменение климата. С помощью метода индикаторов учитываются неколичественные факторы среды. Для оценки предсказательной силы моделей базового периода, они с помощью методики кросс-валидации Аллена верифицируются по найденным эмпирически критериям успешности. Поскольку верифицированные по этим критериям модели на базовый срок используются для построения прогнозных моделей и карт, последние верифицированы частично. Набор фак-

торов среды существенно увеличен за счет использования новой расширенной системы количественных характеристик рельефа.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. При картографическом анализе природных комплексов нередко используют типы местоположений (катенарные сопряжения) как основу для дифференциации лесных экосистем. Типы местоположений оценивали относительным положением на профиле склона, но изменения склонов в плане и экспозицию не учитывали. Было целесообразно ввести модифицированные типы местоположений (*МПЛ*) и способы их использования так, чтобы (а) учесть профиль, план и экспозицию одновременно, (б) разработать метод расчета *МПЛ* как единого фактора, (в) изучить специфику *МПЛ* для двух экорегионов из разных природно-климатических зон и (г) оценить значимость их влияния на пространственную дифференциацию лесных экосистем.

2. Известно, что гидротермические условия (ГТУ) в значительной мере формируют изменчивость лесных экосистем. Для оценки последней в будущем можно рассчитать матрицу ГТУ базового периода по *МПЛ* и рельефу и верифицировать ее. Теперь, с помощью этой матрицы и прогнозных значений ГТУ в точках, рассчитанных аналитическими моделями, использующими данные об изменении климата, можно рассчитать матрицу будущих ГТУ, т.е. уже не только в этих точках. Далее эта матрица может служить предиктором для расчета свойств экосистемы на прогнозные сроки. В результате полученные прогнозные модели и карты являются частично верифицированными.

3. Существенна роль лимитирующего фактора в лесной экосистеме. Однако этот фактор не является единственным, и роль совместного действия лимитирующего фактора с другими была недостаточно изучена. Следовало выяснить, насколько использование ряда факторов эффективнее влияния одного лишь лимитирующего при построении прогнозных карт.

4. Естественно, что прогнозируемое состояние лесных экосистем зависит от их современного состояния, если прогноз оценивается на достаточно малые сроки. Поэтому для эффективного расчета прогнозных карт функциональных и структурных свойств лесных экосистем на эти сроки целесообразно использовать модели и карты современного состояния в качестве предикторов.

5. Известно, что показатели устойчивости лесных экосистем могут оценивать потенциал их климатогенных изменений. Однако отсутствовали карты показателей устойчивости, и сами эти показатели нуждались в усовершенствовании их расчета. Полезность их как предикторов прогнозных состояний оставалась неясной. Поэтому ставилась задача модифицировать расчет индексов устойчивости и оценить целесообразность их использования в качестве предикторов в прогнозном картографировании.

6. Идея подобия катен близких иерархических уровней принадлежит Б.Б. Польшову (1956). Она открывает возможность отразить ландшафтное многообразие климатоген-

ных реакций в типах растительных формаций на бассейновой прогнозной карте баланса суммарного углерода, используя метаболические характеристики, рассчитанные для биогеоценозов исследовательских полигонов. Предлагается сформировать фитокатенарную мозаику по геоботанической карте и матрице мезо-МПП бассейна. Далее элементы этой мозаики можно наделить соответствующими значениями баланса от аналогичного ряда из исследовательских полигонов.

7. Прогнозные региональные карты урожайности рассчитывают обычно на основе ее связи с климатом, реже – и со свойствами почв. При этом считают, что рельеф неважен, а включаемые в модель температуры и осадки не проверяют на их зависимость. Последнее может приводить к серьезным ошибкам. Для расчета прогнозной региональной карты урожайности предлагается учесть рельеф и оценить его значимость в моделях, а также найти корректный способ введения в регрессионные модели зависимых климатических показателей, отражающих хронологическую последовательность их действия, которая известна как важная для урожая.

Личный вклад. Работа является результатом исследований автора за 2001-2016 гг. В системе методов прогнозного картографирования автором предложены: 1) модификации системы катенарных сопряжений и общий подход для их расчета; 2) в качестве предикторов прогнозных карт использование матриц функциональных и структурных свойств лесных экосистем и индексов устойчивости для базового периода, прогнозных гидротермических условий; 3) модификация расчетов индексов устойчивости лесных экосистем; 3) использование климатических инвариантов для прогноза показателей урожайности. Автор самостоятельно осуществлял разработку всех моделей и расчет карт по ним, ставил задачи, интерпретировал результаты.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается основанными на фактах логическими построениями автора, а также статистическими критериями, такими как уровни значимости. Для большинства регрессионных моделей, описывающих состояние экосистем базового периода, осуществлялась верификация (проверка) по выбранному эмпирическому критерию. Поскольку построение прогнозных моделей основывалось не только на прогнозируемых показателях, но и на верифицированных моделях базового периода, рассчитываемые прогнозные карты считались частично проверенными. Балансовые оценки углерода сопоставлены с результатами других авторов.

Апробация результатов. Результаты представлены на конференции «Биологические ресурсы и устойчивое развитие» (Пушино, 2001), на 17 конгрессе по почвоведению (Тайланд, 2002), на международной конференции «Природное наследие России: изучение, мониторинг, охрана» (Тольятти, 2004), на конгрессе «32-nd International Geological Congress» (Италия, 2004), на международной конференции «Ландшафтоведение – теория, методы, региональные исследования, практика» (Москва, 2006), на конференции «Terrain Analysis and Digital Terrain Mapping» (Китай, 2006), на XIII совещании географов

Сибири и Дальнего Востока (Иркутск, 2007), на конференции «Математическое моделирование в экологии» (Пушино, 2009), конференции «География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов» (Пушино, 2010), международной конференции «Плодородие почв – основа устойчивого развития сельского хозяйства» (Минск, 2010), на международной конференции «Резервуары и потоки углерода в лесных и болотных экосистемах бореальной зоны» (Сыктывкар, 2011), на Съезде общества почвоведов им. В.В. Докучаева (Петрозаводск, 2012), на конференции «Состояние и пути повышения эффективности исследований в системе Географической сети опытов с удобрениями» (Москва, 2012), на конференции «Tenth International Conference on Permafrost» (Салехард, 2012), на V конференции «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и сельском хозяйстве» (Москва, 2013), на конференции «Научные основы устойчивого управления лесами» (Москва, 2014) и на IX международной конференции «Тенденции развития науки и образования» (Самара, 2015).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 65 работ, в том числе 35 статей в рецензируемых научных журналах. Из них 12 статей в журналах, включенных в систему цитирования Web of Science и Scopus. С участием автора опубликованы три монографии, а также главы или разделы в семи других монографиях или сборниках.

Структура и объем. Работа состоит из введения и четырех глав (без введения), выводов, приложения и списка литературы (358 ссылок, в том числе 199 на иностранных языках). Общий объем: 247 страниц, включая 64 рисунка и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Введение.

Здесь изложены актуальность, цель и задачи исследования, новизна, защищаемые положения, а также личный вклад автора и практическая значимость работы.

Глава 2. Принципы картографирования лесных и агроэкосистем в пространстве и во времени

2.1. Состояние проблемы

В прогнозных моделях лесных экосистем при изменении климата наибольшее внимание уделялось мелкомасштабным (глобальным) прогнозным картам. Для агроландшафтов также формировали неподробные карты (Tatsumi et al., 2011; Avnery et al., 2013; Huang et al., 2016 и др.). Для построения глобальных карт экосистем и агроландшафтов использовали модели «ведущих» процессов роста растений, которые разные авторы выбирали по-разному. Поэтому применение моделей разных авторов к Швейцарским Альпам, показало, что для прогнозов на 2100 год эти модели дают противоречивые результаты, от сурового вымирания лесов до благоприятных условий для их произрастания (Lischke et al., 1998). Такие модели по одному и тому же климатическому сценарию прогнозировали то потери запасов углерода на 18%, то их рост на 32% (Aber et al., 2001).

Поскольку решения об изменении лесного и сельского хозяйства принимаются на уровне стран или крупных административных образований, была осознана необходимость построения крупномасштабных карт (Scheller, Mladenoff, 2005) и менее субъективных моделей (Iverson, Prasad, 1998). Вместо основанных на процессах (имитационных) моделей, более объективными оказались модели, основанные на статистическом сравнении измеренных характеристик экосистем с факторами среды (Guisan, Zimmermann, 2000). Их недостаток – далеко не полное использование рельефа, что важно для пространственно подробного (сообразно крупному масштабу) прогнозного картографирования экосистем. При крупно- и среднемасштабном прогнозном картографировании возник ряд методологических проблем, таких как

- (A1) выбор методов моделирования, адекватных прогнозному картографированию,
- (A2) представительность описания рельефа,
- (A3) учет типов местоположений (катен),
- (A4) верификация моделей,
- (A5) моделирование действия лимитирующих факторов совместно с другими,
- (A6) использование параметров текущего состояния экосистем для прогнозов,
- (A7) учет и усовершенствование показателей устойчивости экосистем,
- (A8) моделирование при различии масштабов наблюдений и прогнозов,
- (A9) учет хронологической последовательности действия зависимых климатических факторов, особенно важной в агроландшафтах.

Соискателем разработаны (или взяты из литературы, что отмечено) и изучаются соответствующие методы, а также оценивается их применение для ряда ландшафтов.

2.2. Использование геоморфометрии

Обсуждаются методы и использование геоморфометрии – науки о количественном описании земной поверхности – для построения прогнозных карт. На крупных масштабах рельеф отражает пространственную неоднородность факторов среды, которой следует растительность. Морфометрические величины (МВ) количественно описывают рельеф в каждом пикселе цифровой карты. П.А. Шарым разработана расширенная система 18-ти базовых МВ (Shary et al., 2002), представительно описывающая рельеф. Описан смысл МВ, подробнее – в Приложении 1. Это направлено на решение проблемы (A2) и систематически используется в данной работе. Для статистических сравнений использовались нелинейные преобразования МВ из работы (Шарый, Пинский, 2013).

Вместо экспозиции склонов A_0 (циклической: 0° и 360° – одно и то же), которую нельзя использовать в статистических сравнениях, используются 4 преобразования: $\cos A_0$, $\sin A_0$, $\cos A_{45}$ и $\sin A_{45}$, где $A_{45} = A_0 + 45^\circ$ (Шарый и др., 2011). $\sin A_{45}$ априорно использовался в ряде работ (Hwang et al., 2011 и др.) как «главный», т.к. юго-западные склоны обычно лучше прогреваются. Однако это не всегда так (Шарый, Смирнов, 2013).

Важной характеристикой термо- и светорежима склонов является их относительная освещенность $F(a,b)$, где углы a (склонение от горизонта) и b (азимут) описывают эффективное положение Солнца. $F(a,b)$ учитывает одновременно крутизну и экспозицию склонов, описывая перпендикулярность падения солнечных лучей на поверхность.

2.3. Методы статистического анализа

Вместо основанных на процессах (имитационных) моделей, более объективны в экологии модели, основанные на статистическом сравнении характеристик экосистем с факторами среды (Guisan, Zimmermann, 2000). Поэтому для решения проблемы (А1) автором выбраны известные методы множественной регрессии (Montgomery, Peck, 1982).

В общем виде модель множественной регрессии записывается как

$$f(Y) = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5,$$

где X_i есть *предикторы* (независимые переменные, факторы среды), a_i – коэффициенты регрессии, Y – *зависимая переменная* (или отклик), а $f(Y)$ – функция связи. Предикторы не должны быть близки к линейно зависимым, иначе возникает проблема (А9).

Теснота связи между откликом и предикторами оценивалась по коэффициенту детерминации R^2 , а значимость – по уровню вероятности P . Число предикторов в модели фиксировалось как равное 4, т.к. при большем числе предикторов часть их нередко оказывается незначимыми. Это позволяет сравнивать разные модели по R^2 . Значимость предикторов в модели оценивалась с помощью t -статистик Стьюдента (нижний индекс в уравнении регрессии). Критерием независимости предикторов считали значения «факторов вспухания (инфляции) дисперсии» меньше 5,15 (Montgomery, Peck, 1982). На вход модель берет данные из точек наблюдения, но уравнение регрессии осуществляет интерполяцию и экстраполяцию изучаемого свойства Y по матрицам предикторов.

Для учета неколичественных факторов среды (типы почв и др.) использовали индикаторные переменные (Montgomery, Peck, 1982). Индикатор принимает два разных значения (обычно 0 и 1) и делит местность по качественному признаку.

Для решения проблемы (А4) проводилась верификация моделей на базовый период по методике кросс-валидации Аллена (Allen, 1974). Рассчитывались R^2 и «предсказательный» R^2_{Pr} для новых точек наблюдения; обычно R^2_{Pr} меньше R^2 . По ним рассчитывали показатель деградации $Degr = 100 \cdot [(R^2/R^2_{Pr}) - 1]$, а для установления успешности верификации использовали эмпирический критерий $Degr < 50\%$, нарушение которого ведет к нереалистичным картам (Шарый и др., 2011). При нарушении этого критерия модель считалась не прошедшей верификацию.

2.4. Концепция типов местоположений

Для решения проблемы учета местоположений (А3) соискателем разработаны модифицированные типы местоположений и методика их расчета. Сопряжение типов местоположений рассматривают как базу для дифференциации лесной экосистемы (Коломыц, 2005; Тишков, 2005 и др.). Концепция ландшафтных сопряжений местоположений М.А.

Глазовской (1964) учитывает важную для геохимических потоков характеристику – относительное положение точки на профиле склона. Однако, неучтенными оставались важные изменения рельефа в плане (долины и др.) и различия в термо- и светорегиме склонов. Поэтому автором предложена модификация (Шарая, Шарый, 2009), Табл.2.1.

Таблица 2.1. Связь типов местоположений по М.А. Глазовской с модифицированными.

По М.А. Глазовской	Баллы	Модифицированное	Баллы
Элювиальный (Э)	1	Э	1
Трансэлювиальный (ТЭ)	2	ТЭ южных склонов (ТЭю)	2
		ТЭ северных склонов (ТЭс)	3
Транзитный (Т)	3	Т южных склонов (Тю)	4
		Т северных склонов (Тс)	5
Трансаккумулятивный и аккумулятивный (ТА, А)	4	ТА, А	6

Для построения модели модифицированных типов местоположений (*МПЛ*) использовали собранные в поле данные о них, определяли тип в баллах, которые упорядочивались последовательностью сопряжений: от элювиального до аккумулятивного. Статистическая значимость *МПЛ* при сравнении со свойствами экосистем устанавливалась регрессионным анализом. В результате, как показано ниже, обосновано положение о базовой роли типов местоположений в дифференциации лесных экосистем.

В прогнозном анализе возникает множество климатогенных реакций в разных *МПЛ*, но сами геотопы и их сопряжения в ближайшие 50–150 лет не изменятся. Экосистемы меняются под влиянием изменения климата, но их прогнозируемая пространственная организация по-прежнему будет существенно определяться *МПЛ*. Поэтому найденные модели *МПЛ* важны для расчета как базовых, так и прогнозных состояний экосистемы.

2.5. Расчет и построение прогнозных карт

Прогнозные крупномасштабные карты лесных экосистем (глава 3). Прогнозные данные по точкам (площадкам) наблюдения о функциональных и структурных преобразованиях для крупномасштабного картографирования лесных экосистем рассчитывались по аналитическим моделям (Коломыц, 2003, 2008). Учитывалось *пространственное многообразие* локальных функциональных, а затем и структурных перестроек в экосистеме при данном изменении климата. В этих прогнозных моделях (для точек) используются эмпирические данные о связи метаболических параметров лесных экосистем Волжского бассейна с летним содержанием влаги в почве, зависящим от климата. Развиваемые соискателем методы используют 1) данные полевых исследований в точках наблюдения, 2) рассчитанные по ним показатели состояния экосистемы для базового периода (в точках), 3) полученные с помощью прогнозных аналитических моделей данные о климатогенных изменениях этих показателей (в точках), 4) данные о характеристиках рельефа (на растре). Регрессионный анализ связей между свойствами экосистем и *МПЛ* и рельефом позволяет выявлять тесные связи и проводить интерполяцию и экс-

траполяцию этих свойств (из точек в растр). В результате формируются модели свойств экосистемы на базовый период в виде матриц (растров). Они служат основой для формирования пространственно-временных моделей, также в виде матриц. В ГИС-программах эти матрицы визуализируются как карты, но каждый элемент матрицы содержит числовое значение прогнозируемого свойства экосистемы.

Прогнозные карты для лесных экосистем бассейна р. Оки (глава 4). Для формирования региональных карт свойств лесных экосистем Э.Г. Коломыцем предложен *принцип иерархической экстраполяции*, основывающийся на гомологии катен близких иерархических уровней. Это позволяет отразить и учесть многообразие климатогенных реакций в фитокатенах на среднем масштабе, используя рассчитанные на крупном масштабе прогнозные показатели. Этот подход, при применении используемых соискателем методов (регрессия, МПЛ, рельеф), направлен на решение проблемы (А8).

Оценки *экологической инерции* лесных экосистем пока не могут считаться удовлетворительными (Lischke et al., 1998; Beckage et al., 2008), и потому прогнозные карты для них рассчитываются как карты *потенциальных* состояний экосистемы.

Прогнозные карты для агроландшафтов западной части бассейна р. Оки (глава 5). Агроландшафты безинерционны, и здесь, помимо климата, для регионального масштаба особенно важен гидротермический и световой режим склонов, определяемый рельефом. Существенна также хронологическая последовательность действия климатических факторов, которую нельзя учесть в регрессии непосредственно, так как такие предикторы обычно зависимы. В работе на основе исследования (Шарый, 2010) по почвам использован специальный подход для введения в уравнение зависимых предикторов. Они входят в один комбинированный фактор. Этот подход направлен на решение проблемы (А9).

Глава 3. Крупномасштабное прогнозное картографирование при сравнительном изучении лесных экосистем из гумидной и полуаридной зон

3.1. Объекты исследования

Изучаются леса Самарской Луки (СЛ) и Приокско-Террасного заповедника (ПТЗ). СЛ (в Самарской обл.) является низкогорным массивом с преобладающими дубравами и остепненными сосняками на южной границе лесостепной зоны в полуаридном климате. ПТЗ (на юге Московской обл.) представлен эрозионно-моренно-зандровой равниной со смешанными, хвойными и широколиственными лесами, на южной границе зоны смешанных лесов в гумидном климате. Даны описание климата и рельефа СЛ и ПТЗ.

МВ рельефа для обоих участков рассчитывались по матрицам высот разрешения 50 м. Экосистема СЛ описывалась по данным наземного ландшафтно-экологического обследования по 39 площадкам наблюдения, ПТЗ – по 45. Сравнение свойств лесных экосистем полуаридной и гумидной зон позволяет лучше понять различия между откликами

этих экосистем на изменение климата. Здесь изучается также совместное действие лимитирующих факторов с другими и роль индексов устойчивости, проблемы (А5) и (А7).

3.2. Описание сопряжений типов местоположений

Модель связи модифицированных типов местоположений (*МПЛ*) с рельефом для СЛ:

$$\ln MPL_{СЛ} = 1.387 \cdot I_1 \cdot MCA_{+17.62}^{\Pi} - 0.1360 \cdot H_{-3.68}^{\Pi} + 0.009609 \cdot \cos A_0 \cdot GA_{+2.73} - 0.07870 \cdot E_{-2.06}^{\Pi} + 0.02225, \quad R^2 = 0.913 (Degr = 3.4\%), P < 10^{-6}; \quad (3.1)$$
 здесь I_1 есть индикатор плакоров (0 – плакоры, 1 – не плакоры), MCA – площадь сбора, H – средняя кривизна (отрицательна для вогнутых и положительна для выпуклых форм рельефа), $\cos A_0$ – северный компонент экспозиции, GA – крутизна, E – разностная кривизна (незначимый предиктор). 91% пространственной изменчивости *МПЛ* объяснялось этими предикторами, при низкой деградации *Degr* по сравнению с критерием ($Degr < 50\%$), т.е. верификация успешна, что позволяет рассчитать карту *МПЛ* для СЛ (дана карта), проблема (А3). Для ПТЗ модель *МПЛ* также содержит четыре МВ. Уравнения показывают, что катенарные сопряжения на равнине в гумидном регионе в большей степени формируются поверхностным стоком, а в полуаридном низкогорном – формами рельефа, то есть специфика катенарных сопряжений определяется особенностями рельефа и климата региона.

3.3. Картографирование пространственной мозаики гидротермических условий

Модель связи запасов влаги $W100$ в метровом слое почвы для базового срока в СЛ:

$$W100_{BASE_СЛ} = 168.8 \cdot (\ln MPL - \ln MPL_{CP})_{+9.00}^2 + 21.69 \cdot K_{+3.00}^{\Pi} - 479.8 \cdot MDA_{-2.58}^{\Pi} - 0.5388 \cdot F(35,140)_{-1.33} + 571.7, \quad R^2 = 0.738 (Degr = 8.8\%), P < 10^{-6}; \quad (3.2)$$
 здесь K – гауссова кривизна, MDA – дисперсивная площадь, $F(35,140)$ – освещенность склонов с юго-востока (азимут 140°). 74% изменчивости $W100$ объясняется *МПЛ* и рельефом. Главную роль играют *МПЛ*; эта связь нелинейная и описывает рост $W100$ на плакорах и в долинах (Рис.3.1а). Для прогноза влагозапасов на 2125 г. ($W100_{H125_СЛ}$) по сценарию климата HadCM3 A2 в (3.2) заменяли $W100_{BASE_СЛ}$ на $W100_{H125_СЛ}$ (Рис.3.1б).

Эти карты показывают сильное уменьшение влагозапасов в СЛ (в среднем в 3 раза) к 2125 году, что естественно приведет к изменению других свойств лесной экосистемы.

Как и для СЛ, модель для $W100_{BASE_ПТЗ}$ в ПТЗ (даны уравнение и карта) выявляет нелинейную тесную связь с *МПЛ*: $R^2 = 0,583 (Degr = 12\%), P < 10^{-6}$. Известное положение о «давлении местоположений» (Крауклис, 1991) на дифференциацию свойств лесных экосистем подтверждено результатами по распределению $W100$ для обоих регионов.

Для гумидного региона ПТЗ терморезим склонов и температура почвы T играют большую роль, в то время как для аридной СЛ значительнее вклад форм рельефа. Объяснение этого – контрастный рельеф СЛ, когда резкие перепады температуры почвы приводят к рассогласованности T с запасами влаги и большей связи с формами рельефа.

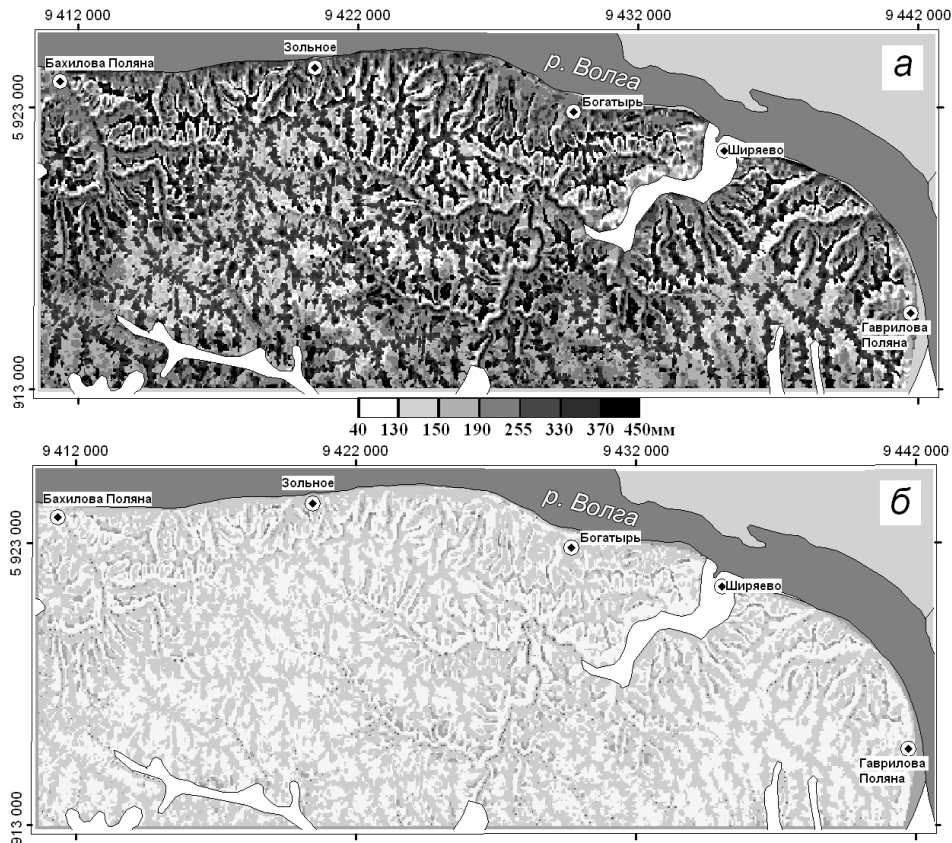


Рис.3.1. Карта пространственной изменчивости запасов влаги в метровом слое почвы для Самарской Луки на базовый период (а), рассчитанная по модели (3.2) и для прогнозного периода на 2125 г. по климатическому сценарию HadCM3 A2 (б). Легенда единая для двух карт.

3.4. Картографирование показателей устойчивости лесных экосистем.

Здесь изучается роль показателей устойчивости и описывается предложенная соискателем модификация индексов устойчивости, проблема (А7). Хотя вопрос об устойчивости экосистем многократно обсуждался (Свирижев, Логофет, 1978; Розенберг, 1984; Thompson et al., 2009 и др.), количественные показатели для ее описания были недостаточно развиты. Различают два вида устойчивости (Holling, 1973): *резистентную* (способность экосистем сохранять структуру и функции при негативном внешнем воздействии) и *упругую* (способность восстанавливать структуру и функции при утрате части компонентов). Первая связана с падением скоростей метаболизма, вторая – с их ростом.

В работах (Коломыц, 1995, 2008) введены количественные показатели резистентной и упругой устойчивости путем учета отношения скоростей синтеза и деструкции. Формулы индексов упругой и резистентной устойчивости модифицированы соискателем путем введения весовых коэффициентов a и b (ранее полагавшихся равными 1), и выглядят как

$$I_{i;упр} = 1 - \sqrt{\frac{KR_{ni}^2 + a \cdot (1 - ML_{ni})^2 + b \cdot HU_{ni}^2}{1 + a + b}}, \quad I_{i;рез} = 1 - \sqrt{\frac{(1 - KR_{ni})^2 + a \cdot ML_{ni}^2 + b \cdot (1 - HU_{ni})^2}{1 + a + b}},$$

где KR_{ni} есть нормированный коэффициент оборота (отношение годичной продукции зеленой массы и массы генеративных частей к общей наземной фитомассе), ML_{ni} – нормированная масса лесной подстилки, HU_{ni} – нормированная масса гумуса.

Общим подходом для нахождения весов является *минимизация* некоего «потенциала», который был бы константой для однородной в пространстве экосистемы. В работе (Шарый, 2010) в качестве такого «потенциала» для почв предложен коэффициент вариации $Kvar$ для одномерной задачи, а здесь задача двумерная и нелинейная. Минимизация $Kvar$ по a и b позволяет найти веса. Существование и единственность минимума $Kvar$ как функции весов a и b соискателем предложено обосновывать графическим построением поверхности $Kvar(a,b)$; нахождение этого минимума дает веса a и b .

Для южной лесостепи в СЛ по этой методике найдены весовые коэффициенты для индексов упругой ($a = 1,93$; $b = 0,42$) и резистентной ($a = 0,12$; $b = 0,40$) устойчивости. Модель пространственного распределения индекса упругой устойчивости в СЛ есть

$$I_{упр_СЛ} = 0.1260 \cdot (\ln MПЛ - \ln MПЛ_{CP})^2_{+7.28} - 0.03650 \cdot \ln MПЛ_{-4.20} + 0.000005622 \cdot (Z - Z_{CP})^2_{+3.60} - 0.001290 \cdot F(35,125)_{-3.31} + 0.4724; \quad R^2 = 0.863 (Degr = 6.4\%), \quad P < 10^{-6}. \quad (3.3)$$

Распределение в пространстве характеризуемого этим индексом восстановительного потенциала лесов зависит в первую очередь от типа *МПЛ*. Связь нелинейная: наибольшие значения $I_{упр}$ имеет на плакорах и в аккумулятивных *МПЛ*. Связь $I_{упр}$ с высотой Z также нелинейная. Снижение $I_{упр}$ происходит на хорошо освещенных с юго-востока склонах ($F(35^\circ, 125^\circ)$). Дана карта $I_{упр}$. Модель с учетом прямых экологических факторов показывает отрицательную связь с температурой почвы и положительную – с влагозапасами, а также что для лесостепи рост температуры почвы и ее иссушение снижают способность лесных экосистем к восстановлению.

Связь индекса резистентной устойчивости $I_{рез}$ с *МПЛ* и рельефом в СЛ:

$$I_{рез_СЛ} = 0.06678 \cdot \ln MПЛ_{+5.65} - 0.1105 \cdot (\ln MПЛ - \ln MПЛ_{CP})^2_{-4.69} + 0.001643 \cdot F(35,170)_{+3.40} - 6.307 \cdot 10^{-6} \cdot (Z - Z_{CP})^2_{-3.10} + 0.5353; \quad R^2 = 0.826 (Degr = 5.8\%), \quad P < 10^{-6}. \quad (3.4)$$

83% пространственной изменчивости $I_{рез}$ объясняется связями с *МПЛ* и высотой Z , а также с освещенностью с юга. Использование в модели гидротермических факторов выявляет, что $I_{рез}$ возрастает на хорошо прогретых склонах и на крутых южных склонах.

Находясь в полуаридном климате, лесные сообщества СЛ характеризуются более высоким средним значением $I_{рез}$ (0,614) по сравнению с $I_{упр}$ (0,449); наибольшим значениям $I_{рез}$ отвечают остепненные сосняки прогретых склонов, наибольшим $I_{упр}$ – широколиственные леса на плакорах.

В ПТЗ другие веса для $I_{упр}$ ($a = 16,01$; $b = 1,07$) и $I_{рез}$ ($a = 0,31$; $b = 1,97$). Модель:

$$I_{упр_ПТЗ} = -0.03082 \cdot 1/GA_{-5.82} + 0.2076 \cdot \cos(A_0)_{+4.60} + 0.06878 \cdot F(35,180)_{+3.39} + 0.07684 \cdot \ln W50_{+2.90} - 3.578; \quad R^2 = 0.516 (Degr = 49.0\%), \quad P < 10^{-5}. \quad (3.5)$$

Видно, что $I_{упр}$ уменьшается на пологих склонах ($-1/GA$), что можно объяснить тенденцией к заболачиванию этой местности. $I_{упр}$ растет на северных ($\cos A_0$) и освещенных с юга склонах ($F(35,180)$). Значимый фактор, поддерживающий $I_{упр}$, есть также запасы почвенной влаги ($\ln W50$). Использование в качестве предикторов почвенных температур и влагозапасов выявляет положительную связь $I_{упр}$ с каждым из них.

В ПТЗ наибольшую упругую устойчивость имеют ксеро-мезоморфные липово-березово-осиновые леса, растущие на карбонатном элювии, а также заболоченные сосняки, ельники и черноольшаники днищ речных долин и междуречных западин.

3.5. Картографические модели запасов и прогнозируемого баланса углерода.

Здесь учет лимитирующих факторов совместно с другими и индексы устойчивости изучаются совместно, проблемы (А5) и (А7). В СЛ пространственное распределение базового суммарного содержания углерода описывается следующим уравнением:

$$C_{\text{BASE_СЛ}} = 0.08450 \cdot W100_{+4.49} + 3.633 \cdot Z_{\text{HILLS}+4.02} + 8.857 \cdot \ln \text{БГЦ}_{+2.83} - 1.097 \cdot GA_{-2.73} + 170.9; \\ R^2 = 0.801 \text{ (Degr} = 8.8\%); P < 10^{-6}. \quad (3.6)$$

80% распределения запасов объясняется запасами почвенной влаги ($W100$), высотой отдельных холмов (Z_{HILLS}), группами биогеоценозов ($\ln \text{БГЦ}$) и крутизной (GA) (Рис.3.2а).

При умеренном холодном тренде по климатическому сценарию E GISS на 2075 г. произойдет снижение влагозапасов на 36% и температуры почвы на 8,2%; прогнозируемые значения углеродного баланса в СЛ будут характеризоваться потерей углерода на 5% от базовых запасов. Наибольшими они будут в широколиственных лесах и производных от них осинниках и березняках средних и нижних частей склонов большой крутизны. Модель углеродного баланса ($\Delta C_{G75_СЛ}$) в СЛ к 2075 г. по сценарию E GISS:

$$\Delta C_{G75_СЛ} = -0.7700 \cdot C_{\text{BASE_СЛ}-14.76} - 18.86 \cdot T100_{G75-4.95} - 487.5 \cdot MDA^{\text{II}}_{-3.81} - 2.256 \cdot GA_{-3.14} \\ + 813.8; \quad R^2 = 0.873 \text{ (Degr} = 24\%), P < 10^{-6}. \quad (3.7)$$

Видно, что наиболее значительная эмиссия CO_2 будет определяться большими значениями базовых запасов углерода C_{BASE} [проблема (А6)], температурой почвы ($T100_{G75}$), дисперсивной площадью (MDA) и крутизной (GA). Карта $\Delta C_{G75_СЛ}$ дана на Рис.3.2б.

При термоаридном тренде (сценарий HadCM3 A2 на 2075 г.) потери CO_2 составят 35% от запасов базового периода. Наибольшая эмиссия CO_2 будет связана с плакорными широколиственными лесами. Модель углеродного баланса по этому сценарию есть

$$\Delta C_{H75_СЛ} = -0.7433 \cdot C_{\text{BASE_СЛ}-19.98} - 4.371 \cdot Z_{\text{HILLS}-3.48} + 605.9 \cdot MCA^{\text{II}}_{+3.17} + 0.1797 \cdot Z_{+2.74} \\ - 550.0; \quad R^2 = 0.934 \text{ (Degr} = 15\%), P < 10^{-6}. \quad (3.8)$$

Модель связывает эмиссию CO_2 в СЛ с большими C_{BASE} и увеличенными высотами отдельных холмов (Z_{HILLS}); это отвечает плакорам. Стоку отвечает рост площади сбора MCA и не слишком малые высоты Z , т.е. тальвеги долин на разных высотах (Рис.3.2в).

В базовый период наибольшие запасы углерода свойственны пологим приводораздельным теневым склонам с малой площадью сбора. В прогнозный срок с этими местами, а также с доньями долин связана увеличенная эмиссия CO_2 . На крутых же склонах изначальные запасы углерода минимальны, и прогнозируемая эмиссия незначительна.

Распределение базовых суммарных запасов углерода в лесной экосистеме ПТЗ зависит в первую очередь от летних влагозапасов, но нелинейно, а их связь с температурой почвы слабее.

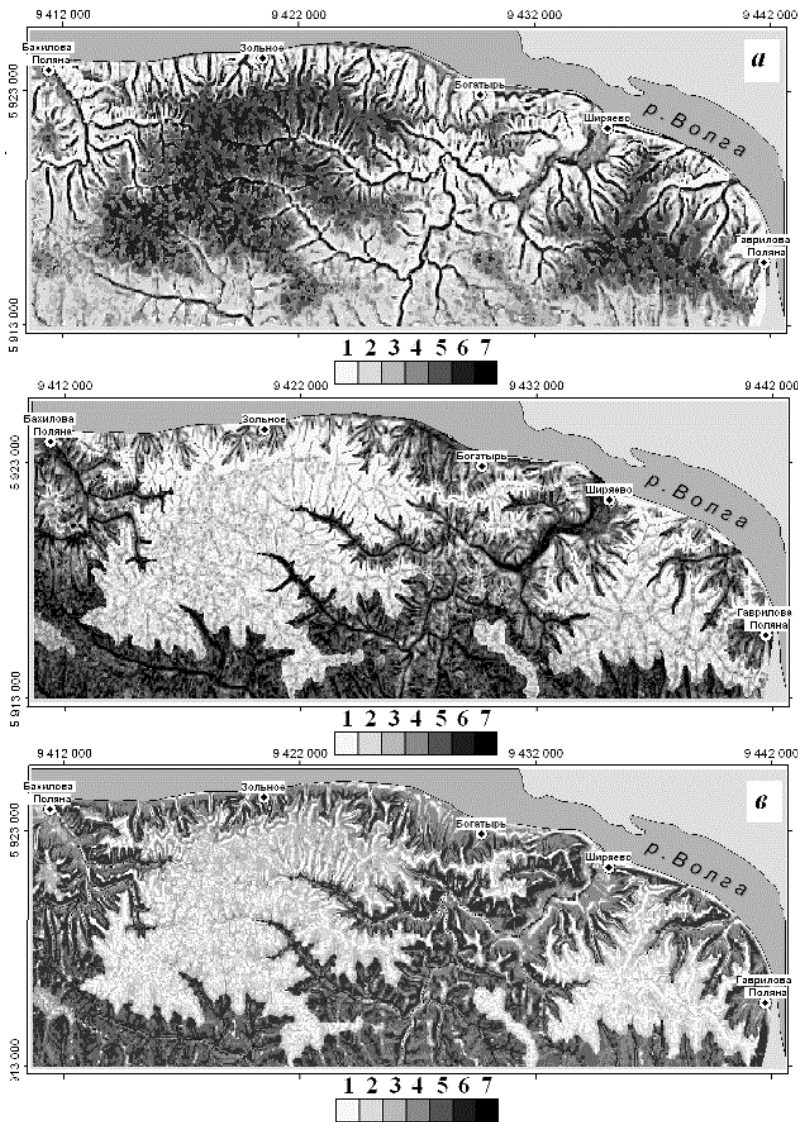


Рис.3.2. Карты базовых суммарных запасов углерода (а) и углеродного баланса к 2075 г. по сценарию E GISS (б) и к 2075 г. по сценарию HadCM3 A2 (в) для территории Самарской Луки.

Легенда к карте (а):

- 1 – 118–207; 2 – 207–217;
- 3 – 217–222; 4 – 222–228;
- 5 – 228–235; 6 – 235–250;
- 7 – 250–397 т/га.

Легенда к карте (б):

- 1 – (–134)÷(–52); 2 – (–52)÷(–40);
- 3 – (–40)÷(–30); 4 – (–30)÷(–15);
- 5 – (–15) ÷ 0; 6 – 0 ÷ 10;
- 7 – 0 ÷ 94 т/га.

Легенда к карте (в):

- 1 – (–211)÷(–102); 2 – (–102)÷(–98);
- 3 – (–98)÷(–91); 4 – (–91)÷(–77);
- 5 – (–77) ÷ (–70); 6 – (–70) ÷ 0;
- 7 – 0 ÷ 88 т/га.

Карты а, б, в рассчитаны по моделям (3.6, (3.7 и (3.8, соответственно.

Карты Рис.3.3 для ПТЗ рассчитывались по следующим уравнениям.

а) Для суммарных запасов углерода базового периода в ПТЗ:

$$C_{BASE_ПТЗ} = -0.001350 \cdot (\ln W50 - \ln W50_{CP})^2_{-32.26} + 3.246 \cdot T50_{+7.95} - 25.32 \cdot I_{упр}_{-3.42} - 2.417 \cdot (\ln MПЛ - \ln MПЛ_{CP})^2_{-2.63} + 190.6; \quad R^2 = 0.980 (Degr = 0.4\%), \quad P < 10^{-6}; \quad (3.9)$$

б) по сценарию E GISS для прогнозного срока 2075 г. в ПТЗ:

$$\Delta C_{G75_ПТЗ} = -20.00 \cdot \ln W50_{-5.35} + 143.6 \cdot I_{упр}_{+2.73} + 20.462 \cdot khe^{\Pi}_{+2.13} - 6.138 \cdot I_1 \cdot \cos A_0 \cdot GA_{-2.04} - 17.62; \quad R^2 = 0.529 (Degr = 15.9\%), \quad P < 10^{-6}; \quad (3.10)$$

в) по сценарию HadCM3 A2 для прогнозного срока 2075 г. в ПТЗ:

$$\Delta C_{H75_ПТЗ} = -312.7 \cdot I_{рез}_{-10.60} - 11.69 \cdot \ln W50_{-3.04} + 15.01 \cdot khe^{\Pi}_{+2.29} - 4.584 \cdot I_1 \cdot \cos A_0 \cdot GA_{-2.04} + 248.5; \quad R^2 = 0.818 (Degr = 3.3\%), \quad P < 10^{-6}. \quad (3.11)$$

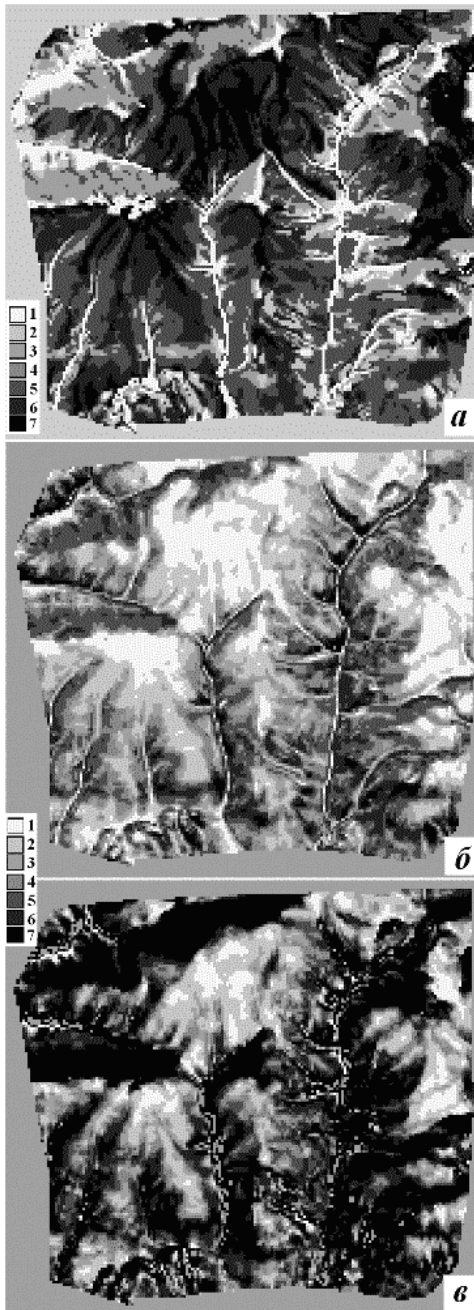


Рис.3.3. Карты распределения базовых запасов (а) и баланса углерода по территории Приокско-Тerrasного заповедника к 2075 г. по климатическим сценариям E GISS (б) и HadCM3 (в), рассчитанные по моделям (3.9) (3.10 и (3.11, соответственно).

Условные обозначения для карты а:

- 1 – 103–195, 2 – 195–202,
3 – 202–204, 4 – 204–205,
5 – 205–208, 6 – 208–210,
7 – 210–238 т/га;

для карт б, в:

- 1 – (–172)–(–27), 2 – (–27)–(–14),
3 – (–14)–(–8), 4 – (–8)–0,
5 – 0–9, 6 – 9–24,
7 – 24–122 т/га.

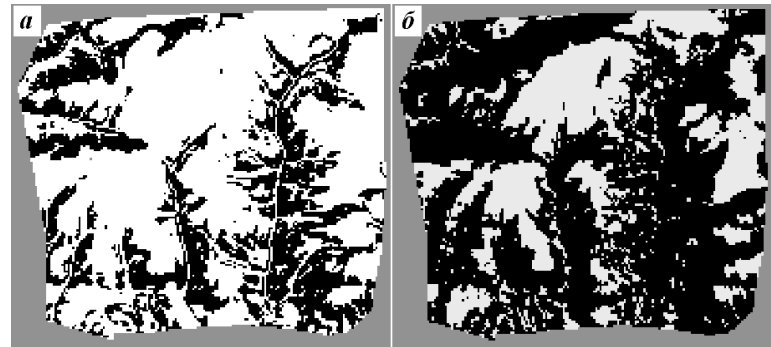


Рис.3.4. Карты расположения участков депонирования (черные) и эмиссии (белые) углерода в ПТЗ по климатическим моделям E GISS (а) и HadCM3 A2 (б) к 2075 г.

Модель (3.9) подтверждает, что распределение в пространстве базовых запасов углерода в ПТЗ определяется в первую очередь летними влагозапасами, изучаемыми автором совместно с другими факторами, проблема (A5). Базовые запасы отрицательно связаны с индексом упругой устойчивости $I_{упр}$ и типами МПЛ (Рис.3.3а).

Для холодно-гумидного сценария, модель (3.10), в ПТЗ характерно преобладание отрицательных ΔC (т.е. эмиссия С). Эмиссия С будет связана с ростом влагосодержания ($\ln W_{50}$), низкими значениями $I_{упр}$, а также с относительно малой расчлененностью рельефа (khe) и крутыми северными склонами вне плакоров ($I_1 \cdot \cos A_0 \cdot GA$) (Рис.3.3б).

По термоаридному сценарию HadCM3 A2 доминирующее в ПТЗ прогнозируемое депонирование С будет определяться лесными биогеоценозами с низкими $I_{рез}$ и малыми влагозапасами, а также с большой расчлененностью местности (khe) и крутыми южными

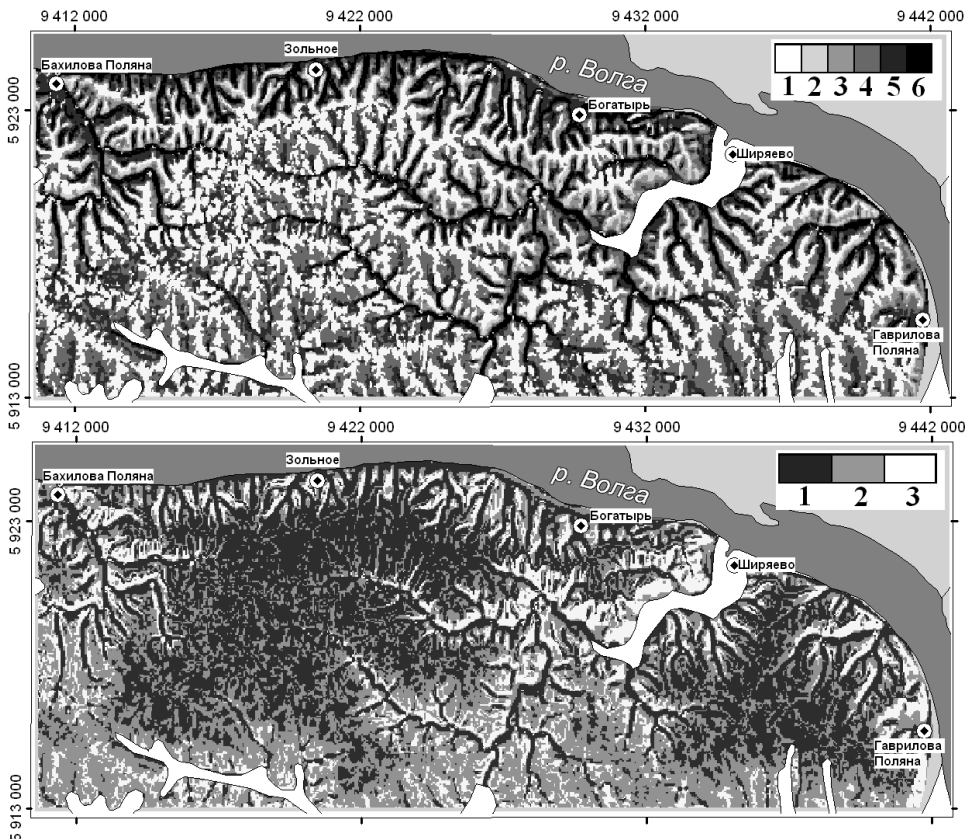
склонами вне плакоров ($I_1 \cdot \cos A_0 \cdot GA$) (Рис.3.3в). Как видно из карт, для смешанных лесов на южной границе зоны в базовый период наибольшие запасы С свойственны слабо-наклонным приводораздельным областям с малой площадью сбора. В прогнозный срок эти места, а также относительно крутые склоны, особенно южной экспозиции, будут отличаться наибольшей эмиссией CO_2 . Лесные же массивы в оврагах и притальвеговых областях окажутся областями с наибольшим депонированием углерода (Рис.3.4). Для ПТЗ по сценарию E GISS ожидается снижение запасов С на 1% от базовых, а по HadCM3 A2 – их рост почти на 7%. Таким образом, для расчета баланса углерода целесообразно использовать индекс упругой устойчивости $I_{упр}$, проблема (A7).

3.6. Картографирование структурных состояний экосистем для базового и прогнозных периодов.

Биогеоценозам (БГЦ) СЛ и ПТЗ присвоены баллы в соответствии с их положением в катене (см. описание БГЦ на Рис.3.5). Модель БГЦ для СЛ на базовый срок есть $\ln BGC_{BASE_СЛ} = 0.8823 \cdot \ln MПЛ_{+19.61} - 0.3222 \cdot (\ln MПЛ - \ln MПЛ_{CP})^2_{-3.51} - 0.00611 \cdot F(35,135)_{-3.49} - 0.0144 \cdot GA_{-2.78} + 0.700$, $R^2 = 0.961$ ($Degr = 1.1\%$), $P < 10^{-6}$, (3.12) где $F(35,135)$ – освещенность с юго-востока. 96% изменчивости БГЦ объясняется МПЛ и рельефом (Рис.3.5, верх). Модель БГЦ отлична от модели МПЛ (3.1) тем, что один БГЦ может занимать два и более МПЛ, а в одном МПЛ могут находиться два БГЦ.

Для расчета модели фитоценозов на 2125 г. по сценарию климата HadCM3 A2 в СЛ использовались наиболее вероятные переходы между базовыми БГЦ и прогнозируемыми БГЦ, рассчитанные аналитически в работе (Коломыц, 2008). Прогнозируемые в экосистеме по экстремальному сценарию HadCM3 A2 структурные изменения будут существенны, т.к. HadCM3 дает повышение среднеиюльской температуры в СЛ к прогнозному сроку на $7,2^\circ C$. Для построения модели пространственно-временных изменений присваиваем новые значения в баллах прогнозируемым фитоценозам, выстраивая ряд по прогнозируемому влагосодержанию, с ростом которого баллы падают. Это дает модель $\ln BGC_{H125_СЛ} = -0.8133 \cdot (\ln MПЛ - \ln MПЛ_{CP})^2_{-6.95} - 6.051 \cdot MDA^{\Pi}_{-4.89} - 0.2618 \cdot \ln MПЛ_{-3.90} + 0.004024 \cdot F(35,120)_{+1.53} + 6.622$, $R^2 = 0.782$ ($Degr = 8.3\%$), $P < 10^{-6}$, (3.13) где MDA – дисперсивная площадь, а $F(35,120)$ – освещенность склонов с юго-востока. 78% изменчивости БГЦ объясняется МПЛ и рельефом (Рис.3.5, внизу). Если выбрать предикторами прогнозируемые запасы влаги и температуры почвы, то такая модель объяснит 75% изменчивости рельефом и прямыми факторами, но первыми предикторами с бóльшими уровнями значимости (t -статистиками, раздел 2.3) останутся МВ.

Уравнение пространственного распределения БГЦ в лесном массиве ПТЗ есть $\ln BGC_{BASE_ПТЗ} = 0.1816 \cdot TI_{+8.13} + 0.6415 \cdot \ln MПЛ_{+2.98} + 0.6244 \cdot (\ln MПЛ - \ln MПЛ_{CP})^2_{+2.07} + 9.379 \cdot MDA^{\Pi}_{+1.55} - 8.150$, $R^2 = 0.797$ ($Degr = 4.3\%$), $P < 10^{-6}$. (3.14)



Наиболее вероятные переходы фитоценозов, прогнозируемые к 2125 г.:

(1), (6) → (1),
 (3), (4), (5) → (2),
 (2) → (3).

Обозначения (номера) взяты из легенды.

Рис.3.5. Карта биогеоценозов базового периода (вверху) для лесной экосистемы Самарской Луки, построенная по модели (3.12): (1) – вязо-липняки и кленово-липовые осинники (элювиальные), (2) – редкостойные остепненные сосняки, (3) – сосняки сложные и сосново-широколиственные леса, (4) – дубняки и осинники, (5) – дубово-вязо-липовые леса и производные от них, (6) – липняки, кленовики и осинники. Карта биогеоценозов, прогнозируемых к 2125 году (внизу) с помощью климатического сценария HadCM3 A2 по модели (3.13): (1) – редкостойные остепненные сосняки, Э, А; (2) – южностепная растительность, Т, ТА; (3) – пустынно-степная растительность, ТЭ.

Для находящейся в гумидной зоне экосистемы ПТЗ *МПЛ* оказываются не на первом месте, как в (3.12) для СЛ, но уступают место топографическому индексу влажности почв *TI*, описывающему площадь сбора с учетом крутизны. *MDA* есть также гидрологически важная дисперсивная площадь. Карта современных *БГЦ* показана на Рис.3.6.

Для построения модели наиболее вероятных структурных преобразований в ПТЗ к 2125 году по сценарию климата HadCM3 A2 использовали фитоценозы, присваивая им баллы по возрастанию гидроморфизма (нумерация переходов на Рис.3.7). Уравнение:

$$\ln \text{БГЦ}_{\text{Н125_ПТЗ}} = 0.3280 \cdot \ln \text{МПЛ}_{+4.68} + 0.4324 \cdot (\ln \text{МПЛ} - \ln \text{МПЛ}_{\text{CP}})^2_{+4.08} - 0.4888 \cdot E_{-3.22}^{\text{П}} + 0.0151 \cdot \text{TI}_{+2.15} - 0.4202, \quad R^2 = 0.673 \text{ (Degr} = 7.9\%), P < 10^{-6}. \quad (3.15)$$

Эта модель показывает, что прогнозируемые структурные преобразования произойдут в согласии с установленным катенарными сопряжениями порядком, причем смена *БГЦ* в катенах будет «тормозиться» на участках с преобладанием вогнутых в профиле склонов (разностная кривизна *E*) и «ускоряться» при выполаживании склонов. Сравнение Рис.3.6 и Рис.3.7 показывает, что этих преобразования обеднят структуру ПТЗ.

Этим выявлено, что структурная организация двух экосистем в базовом периоде следует в первую очередь *МПЛ*, проблема (А3). Для СЛ с контрастным рельефом в полуаридном климате на структуру влияют также освещенность склонов и их крутизна; в гумидном климате для ПТЗ – поверхностный сток. Модели современных *БГЦ* можно также построить, используя влагозапасы и температуры почв. Тогда для структурной организации СЛ главное – влагозапасы, для ПТЗ – температуры, но модели показывают, что эти лимитирующие факторы действуют совместно с другими, проблема (А5).

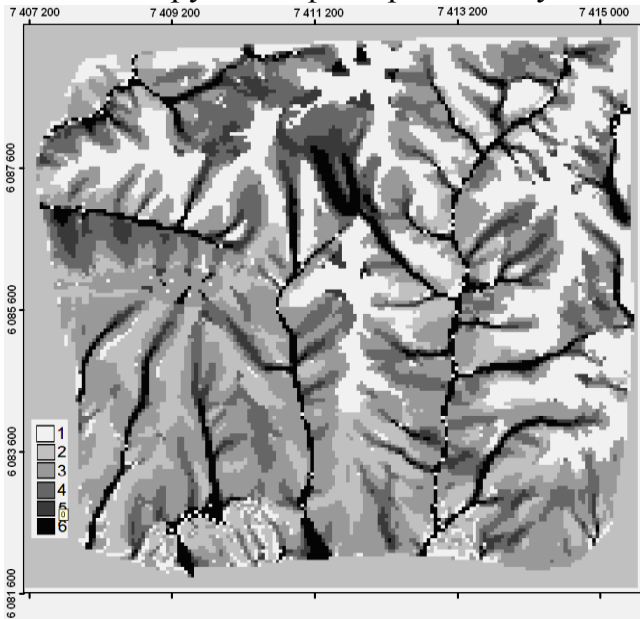


Рис.3.6. Карта биогеоценозов Приокско-Террасного заповедника базового периода, построенная по модели (3.14):

- 1 – еловые и сосново-еловые кислично-разнотравные, Э, ТЭ,
- 2 – сосняки и сосново-березовые леса зеленомошно-вейниково-разнотравные, Э, ТЭ,
- 3 – липово-березовые леса разнотравные, ТЭ,
- 4 – сосново-липово-дубовые разнотравно-широколиственные, ТЭ–ТА,
- 5 – ельники и сосново-еловые леса чернично-разнотравные, Т, ТА,
- 6 – хвойные и мелколиственные леса кустарничко-сфагновые высокотравные, Э, супераккумулятивные.

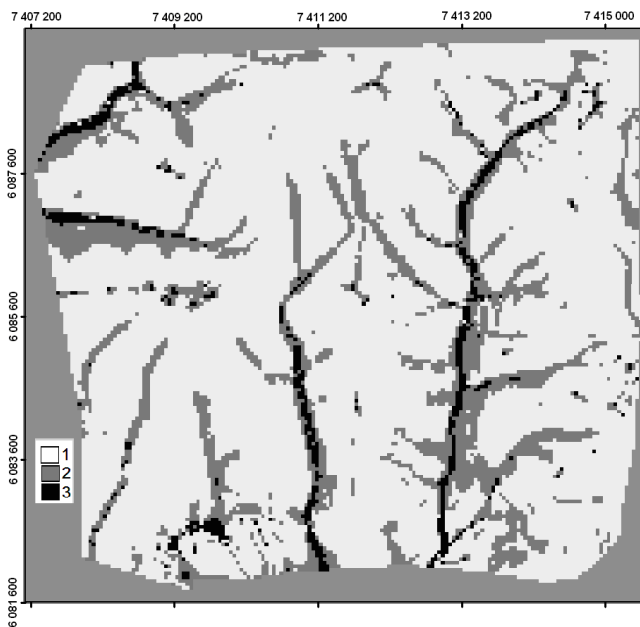


Рис.3.7. Карта прогнозируемых биогеоценозов для Приокско-Террасного заповедника к 2125 г. (по сценарию климата HadCM3 A2), построенная по модели (3.15): **1** – южнолесостепная растительность, **2** – липово-березовые леса разнотравные, **3** – сосново-липово-дубовые леса разнотравно-широколиственные.

Наиболее вероятные переходы биогеоценозов базового периода при структурном преобразовании экосистемы к 2125 году по модели HadCM3 A2: А) биогеоценозы базового периода (1), (2), (4), (5) → южнолесостепная растительность; Б) биогеоценозы базового периода (6) → сосново-липово-дубовые леса разнотравно-широколиственные; В) биогеоценозы базового периода (3) не совершают переходов.

Глава 4. Углеродный баланс лесных экосистем Окского бассейна

Здесь изучаются эффекты использования данных от разных масштабов, роль катен и рельефа, проблемы (А8), (А3) и (А2). Приведены методы и результаты ландшафтно-экологического подхода к формированию региональных карт суммарных запасов угле-

рода и прогнозируемого углеродного баланса в бассейне р. Оки при изменении климата. Этот бассейн (250 тыс. км²) занимает около трети площади бассейна р. Волги. На его территории находятся 26 типов лесных формаций (Исаченко, Лавренко, 1974). Почти половина из них представлена вторичными мелколиственными лесами, коренные еловые и широколиственные леса занимают не более 8% от площади лесного покрова. Для прогноза баланса суммарных запасов углерода в лесных формациях к 2075 г. использовали «жесткий» (термоаридный) сценарий климата HadCM3 A2.

4.1. Состояние вопроса

Пространственная изменчивость лесных экосистем не мала, приводя к сильной вариативности баланса углерода в изучаемом регионе. Хотя немало усилий уделено разработке методик определения углеродных пулов в различных компонентах фитобиоты в лесных экосистемах (Заварзин, 2007; Швиденко, 2012; Усольцев и др., 2015 и др.), общая точка зрения на пространственное распределение наземных стоков и источников углерода пока не сформирована (Замолотчиков и др., 2011).

Цель главы – разработать методы формирования региональной бассейновой модели баланса углерода, учитывающей пространственную вариативность внутри лесных формаций бассейна р. Оки, используя идею подобия катен, геоботаническую карту, региональную карту мезоместоположений и прогнозные метаболические данные, полученные для фитокатен на более крупных масштабах, проблемы (A3) и (A8).

4.2. Объекты, методы и постановка задачи

Использовались результаты крупномасштабных наземных исследований на восьми полигонах Волжского бассейна в 1987–1999 гг., в которых проф. Э.Г. Коломыцем получен экспериментальный материал ландшафтно-экологических съемок по специально разработанной методике (Коломыц, 1995, 2008). Эти полигоны охватывали спектр зональных систем – от южной лесостепи до смешанных лесов южнотаежного облика. В полигонах на основе 45–65 пробных площадей выделялись шесть фациальных групп, охватывающих основное разнообразие типов леса в полигонах; эти группы отвечали различным типам *МПП*. Данные о растительных формациях взяты из геоботанической карты (Исаченко, Лавренко, 1974). Сценарий климата HadCM3 A2 на 2075 г. дает в Поволжском регионе повышение среднеиюльской температуры на 5,5–7,0°C; годовые осадки почти не изменятся, поэтому коэффициент атмосферного увлажнения снизится. Летнее влагосодержание почвы рассчитывалось по методу (Коломыц, 2008).

Для создания региональной карты использовались спутниковые данные НАСА о рельефе – SRTM30 разрешения 600 м. Расчеты матриц характеристик рельефа и типов мезо-*МПП* проводились в программе «Аналитическая ГИС Эко» (Шарый, 2004).

Основные допущения разрабатываемой модели включали в себя: а) закономерности пространственного распределения типов *МПП* в мезорельефе бассейна р. Оки подобны таковым локальных катен опытных полигонов (Полынов, 1956); б) сопряженные ряды

растительных ассоциаций (фитокатен) близких иерархических уровней гомологичны; в) характер сдвигов в малом биологическом круговороте – в скоростях продуцирования и разложения фитомасс и изменения массы гумуса в растительных формациях – близких иерархических уровней на фоновые климатические воздействия подобен.

4.3. Формирование карты запасов углерода в лесных экосистемах бассейна.

С помощью методов геоморфометрии (раздел 2.3) была рассчитана карта модифицированных типов мезоместоположений (раздел 2.4) для Окского бассейна. Процедура формирования региональной карты прогнозируемых запасов углерода и его баланса на 2075 г. состояла в следующем. А) Каждый тип/подтип растительных формаций на геоботанической карте соотносился с определенной группой биогеоценозов из аналогичного ему фитокатенарного ряда соответствующего полигона. Б) На рассчитанную карту мезо-МПП наносились ареалы растительных формаций и каждый ареал распадался на элементы мезомасштабных ландшафтных сопряжений. В) Каждый элемент фитокатенарной мозаики насыщался соответствующими ему базовыми или прогнозными метаболическими показателями биогеоценозов.

Запасы углерода в бассейне имеют контрастный узор (дана карта), меняясь от 43 до 423 т/га, из-за пространственной неоднородности растительных формаций. Региональная прогнозная карта изменения запасов углерода к 2075 г. показана на Рис.4.1.

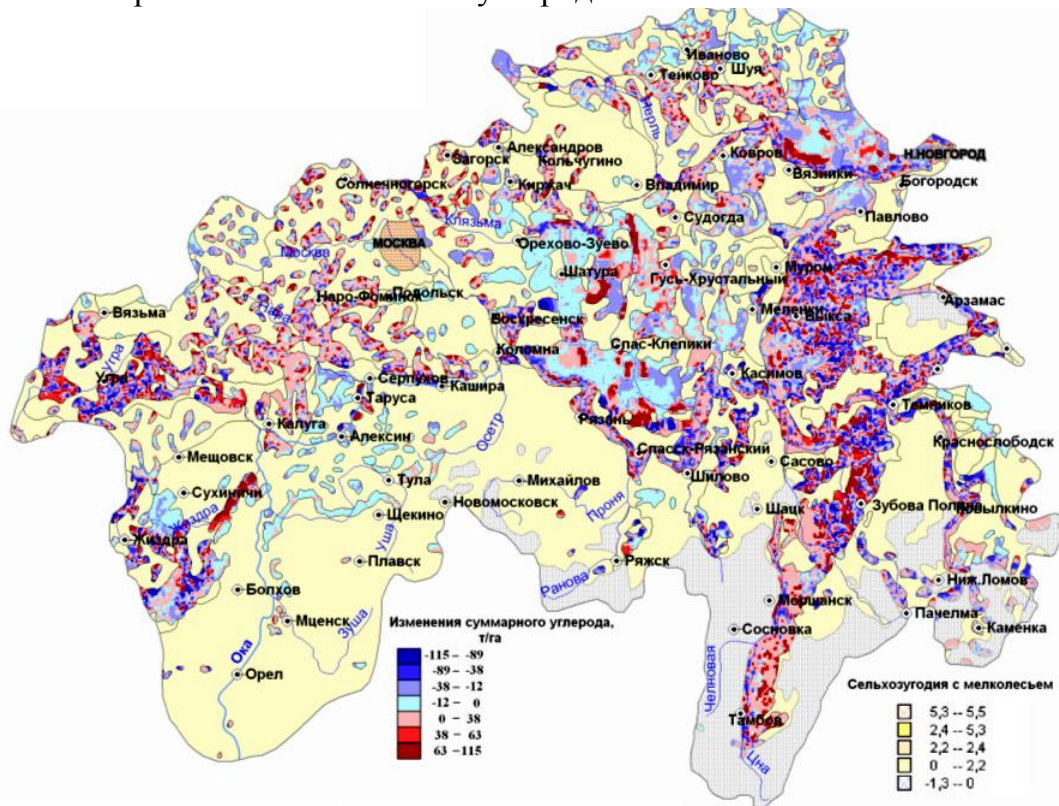


Рис.4.1. Карта распределения углеродного баланса по территории Окского бассейна на прогнозный срок 2075 г. (по сценарию HadCM3 A2). Изменение суммарных запасов углерода по отношению к базовому периоду (т/га). Для лесных территорий: 1 – $(-136) \div (-89)$; 2 – $(-89) \div (-38)$; 3 – $(-38) \div (-12)$; 4 – $(-12) \div 0$; 5 – $0 \div 38$; 6 – $38 \div 63$; 7 – $63 \div 115$. Для фрагментарных лес-

ных массивов на сельскохозяйственных полях в пределах лесостепной зоны: 8 – $(-1.3) \div 0$; 9 – $0 \div 2.4$; 10 – $2.4 \div 5.5$. 11 – территория северной степи.

Согласно полученным модели и карте (Рис.4.1), лесной покров Окского бассейна в целом будет осуществлять к прогнозируемому сроку сток углерода (43,8 млн. т), который составит 3,0% от запасов базового периода (1476,8 млн. т) при этом депонирование (145,3 млн. т, 9,8%) будет несколько преобладать над эмиссией (101,5 млн. т, 6,9%). Прогнозная карта показывает резкую контрастность положительных и отрицательных величин углеродного баланса, диапазон изменения от -136 до $+115$ т/га.

Результаты по балансу для разных групп растительных формаций Окского бассейна сильно различаются (дана таблица). Наибольший положительный вклад в суммарный сток С к 2075 году будут давать вторичные леса на месте еловых и смешанных (8,9% от базовых запасов С в этих лесах), сосновые и широколиственно-сосновые смешанные леса (4,7% от базовых запасов), площадь которых наибольшая. Вторичные же леса на месте сосновых и смешанных будут давать заметный отрицательный вклад в суммарный сток (эмиссия составит 3,2% от базовых запасов).

4.4. Обсуждение и заключения

Для расчета карт запасов и прогнозируемого баланса углерода в лесах бассейна р. Оки использовался метод иерархической экстраполяции, предполагающий гомологию фитомезокатен бассейна фитокатенам изученных полигонов, проблемы (А3) и (А8). Полученная карта представлена контрастной мозаикой и похожа на мелко мозаичную карту баланса углерода для бореальных лесов Канады, составленную по дистанционным данным и результатам другого моделирования в 1980–1989 гг. (Gamon et al., 2004). Диапазоны стока и эмиссии углерода на карте лесов Канады имели близкие значения (от $-2,0$ до $+2,0$ тС·га⁻¹·год⁻¹). На карте канадских лесов около 35% площади характеризуется слабым депонированием от 0,1 до 0,5 тС·га⁻¹·год⁻¹; на карте прогнозного баланса углерода в лесах бассейна (Рис.4.1) таких значений меньше, что объясняется сравнительно сильными прогнозируемыми отклонениями температуры от температуры 1980–1989 гг.

Общий сток С в лесах России до 1988 г. по оценкам работы (Замолотчиков и др., 2011) составлял 80 Мт/год. Леса бассейна р. Оки составляют 1,17% площади лесов России, отсюда средний сток в них порядка 0,94 Мт/год. Если сток не изменится, то за 65 лет (с 2010 г. по 2075 г.) он составит 61,1 Мт. Модель оценивает депонирование 44,0 Мт суммарного С в лесах бассейна. В прогнозных оценках данной работы депонирования суммарного С, это означает снижение связывания СО₂ на величину порядка 30%, что вполне ожидаемо при сценарии экстремального потепления из-за увеличения эмиссии. Модель прогнозирует депонирование как относительно слабое, составляющее в среднем 0,38 тС·га⁻¹·год⁻¹, что близко к современному депонированию С в фитомассе тундры Европейской России (Воронов и др., 2010).

Глава 5. Прогнозные оценки урожайности озимой пшеницы с учетом рельефа, климата и почв

5.1. Состояние вопроса

Хотя о связи урожая озимой пшеницы *Triticum aestivum* L. с факторами среды (Дуденко и др., 2002; Amthor, 2007 и др.) и устойчивости пшеницы к их действию (Петрова, 1987; Si, Farrell, 2004; Сиротенко и др., 2011 и др.) есть множество работ, очень мало известно о совместном действии факторов (Генкель, 1969; Lobell, Burke, 2010; Павлова, 2015 и др.). Тем более, это не изучалось на местностях протяженностью сотни километров при пространственном разрешении ~600 м, когда можно учесть пространственную изменчивость и климата, и рельефа. В физике атмосферы (Floors et al., 2014) установлено, что близ земной поверхности происходит усреднение температуры воздуха на сотнях метров, так что для учета микроклимата важен именно мезорельеф.

Метеостанции в значительной мере теряют биологически важную информацию о микроклимате, возникающем из-за рельефа (Романова, 1977; Hwang et al., 2011). Рельеф пытались фрагментарно учитывать в работах по пшенице, но на базе неколичественного описания склонов (Walley et al., 2001; Basso et al., 2009) или с помощью немногих МВ (Si, Farrell, 2004; Ferrara et al., 2010 и др.). В России моделирование урожая, в том числе и прогнозное, давало лишь мелкомасштабные карты с оценками средних по субъектам федерации (Николаев, 1994; Сиротенко и др., 2011 и др.).

Для оценки роли рельефа необходимо было использовать расширенный набор МВ, проблема (A2). При таком подходе нами было показано, что главным фактором пространственной изменчивости урожая озимой пшеницы на региональном масштабе является освещенность мезосклонов с юго-запада (Шарый, Шарая и др., 2011, 2012).

Целью главы является изучение влияния освещенности склонов (характеристики рельефа) на прогнозируемую урожайность озимой пшеницы, а также введение в прогнозные модели зависимых температур и осадков, отражающих важную для урожая хронологическую последовательность их действия, проблема (A9).

5.2. Учет рельефа, осадков и типов почв

Участок исследования (запад Окского бассейна) имеет размеры около 3°×4° и имеет почвы в основном трех типов (с севера на юг): дерново-подзолистые, серые лесные и маломощные черноземы. Данные об урожайности взяты из базы данных «Агрогеос», о рельефе – SRTM30, о климате – WorldClim, о почвах – из почвенной карты М 1:2,5 млн.

Уравнение регрессии для максимальной прибавки урожая озимой пшеницы, которая есть разность между урожаем, полученным при внесении оптимальной дозы удобрений и урожаем без удобрений, усредненная по времени, при использовании мезорельефа (разрешение 600 м, объем выборки 41) есть

$$\text{Прибавка} = 4.269 \cdot F(35,230)_{+7.16} + 3.117 \cdot P_{\text{фев}}_{+5.73} + 0.3771 \cdot I \cdot P_{\text{фев}}_{+5.64} - 0.3034 \cdot P_{\text{год}}_{-4.90}$$

$$-138.6, \quad R^2 = 0.740 \quad (Degr = 6.9\%), \quad P < 10^{-6}. \quad (5.1)$$

Здесь $F(35^\circ, 230^\circ)$ – освещенность склонов с юго-запада, $P_{фев}$ – средние многолетние осадки февраля, I – индикатор, равный 1 для дерново-подзолистых почв и 0 – для других, $P_{год}$ – среднегодовые осадки. Все факторы значимы, показатель деградации $Degr$ меньше допустимого 50%. Предикторы объясняют 74% изменчивости прибавки. Самый значимый из них – освещенность склонов с юго-запада. Температуры и суммы активных температур не вошли в модель. Связь прибавки с $P_{фев}$ показывает, что для ее возрастания нужно улучшать меры по снегозадержанию, а с $P_{год}$ – учитывать вымокание.

Для расчета прогнозной карты урожайности использовалась модель (5.1), в которой матрицы осадков для базового периода заменяли на прогнозируемые сценарием климата E GISS на 2050 г. Рост $P_{фев}$ по этому сценарию составит 12,3%, а $P_{год}$ – 4,4%, т.е. позитивные эффекты роста $P_{фев}$ сильнее негативных эффектов вымокания урожая. Рост прибавки по региону к 2050 г. составит в среднем 12,2% (с 11,7 до 13,1 ц/га), Рис.5.1.

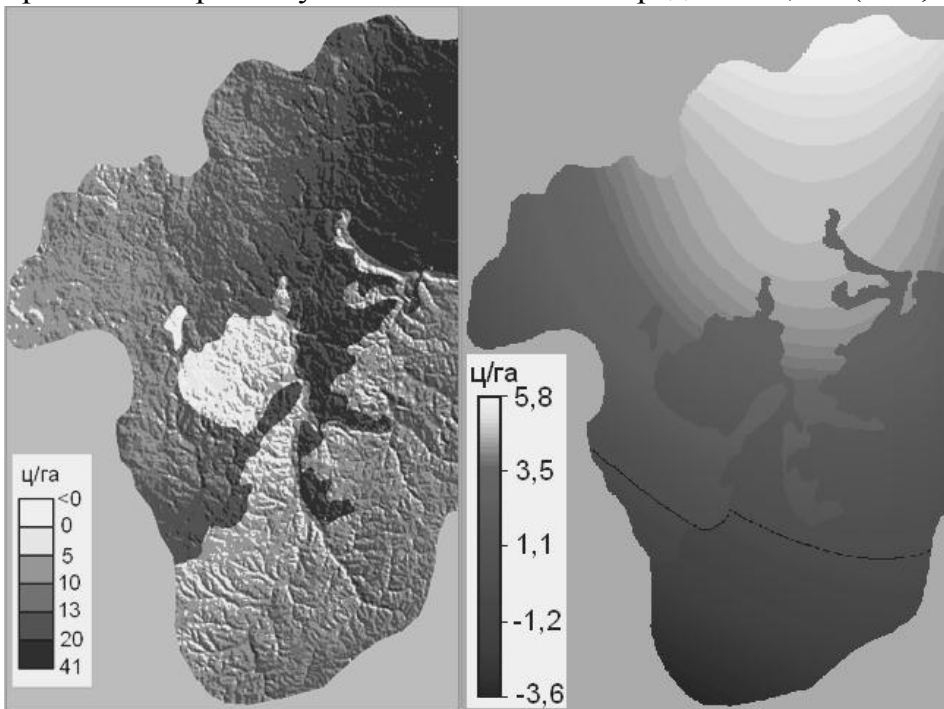


Рис.5.1. Карты прогнозируемой по сценарию климата E GISS к 2050 г. прибавки урожая, рассчитанные по модели (5.1) (слева), и ее изменений за период 1980-2050 г. (справа), отрицательных южнее черной линии.

На склонах разной освещенности прибавка изменится по-разному: на хорошо освещенных с юго-запада склонах, где $F(a,b)$ больше среднего, прибавка будет на 7,3 ц/га больше, чем на слабо освещенных (15,8 и 8,5 ц/га, соответственно). Несмотря на малое различие в освещенности склонов, на 5% (около 25 Вт/м²), прибавка оказывается значительно (в 1,9 раза) больше на хорошо освещенных склонах. К 2050 г. освещенность слабо изменится, поэтому в карте изменения прибавки (Рис.5.1, справа) исчезает связь с ней. Это, однако, – недостаток модели, т.к. микроклимат изменится.

Чтобы карта изменения прибавки во времени отражала это, в модель введен перекрестный член: произведение освещенности с юго-запада на осадки февраля. Этим учтены изменения прибавки на склонах разной освещенности с одновременным влиянием на нее осадков февраля. В результате получили модель

$$\begin{aligned} \text{Прибавка} = & 0.05406 \cdot F(35,230) \cdot P_{\text{фев}+5,76} + 0.006577 \cdot I \cdot F(35,230) \cdot P_{\text{фев}+5,67} - 0.3053 \cdot P_{\text{год}-4,14} \\ & + 2.582 \cdot F(35,230)_{+3,85} - 40.12; \quad R^2 = 0.742 \text{ (Degr} = 6.8\%), P < 10^{-6}, \end{aligned} \quad (5.2)$$

где $F(35,230) \cdot P_{\text{фев}}$ и $I \cdot F(35,230) \cdot P_{\text{фев}}$ есть перекрестные члены. Теперь на карте изменения прибавки (Рис.5.2 слева) видны неоднородности на склонах разной освещенности.

Для изучаемого региона возрастание прибавки к прогнозируемому сроку составит по модели (5.2) 11,8% (рост с 11,7 до 13,2 ц/га), в среднем прогнозируемая прибавка на изученной территории будет возрастать с юга на север. Полученное значение близко к возрастанию по модели (5.1), однако при этом не потеряна информация о различиях в изменении прибавки на склонах разной освещенности, модель (5.2).

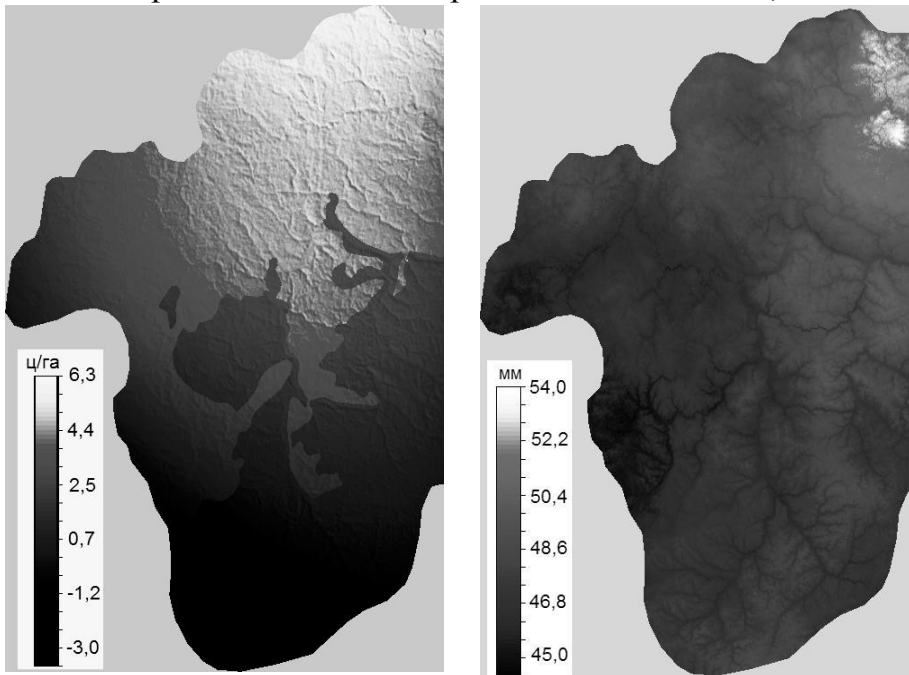


Рис.5.2. Слева: карта изменения прибавки урожая озимой пшеницы по сценарию климата E GISS к 2050 г. для изучаемого региона, рассчитанная по модели (5.2), содержащей перекрестные члены для отражения на карте изменений влияния освещенности склонов.

Справа: карта климатического инварианта $INV(P_{\text{фев}}, T3-5)$ для базового периода.

5.3. Учет рельефа, температур, осадков и типов почв

В этом разделе вводится предиктор, описывающий хронологическую последовательность действия климатических факторов, проблема (A9).

Часто прогноз урожаев обсуждают в связи с изменением температур вегетационного периода (Lobell, Field, 2007 и др.). Температуры не вошли в модели (5.1) и (5.2) из-за их связи с осадками, т.к. зависимые предикторы исключались. Известно, что урожаи озимой пшеницы чувствительны к хронологической последовательности условий погоды (Генкель, 1969): например, если за вызывающим вымерзание пшеницы бесснежным февралем следует холодная весна, то урожай пшеницы резко падает. Если такие сочетания погодных условий часто повторяются, закрепляясь в климате, то можно использовать стабильное пространственное сочетание (инвариант) зависимых переменных вместо их самих; П.А. Шарый (2010) ввел метод расчета инвариантов для почв. Модель есть

$$\begin{aligned} \text{Прибавка} = & 4.462 \cdot F(35,230)_{+7,70} + 10.20 \cdot I \cdot T(3-4)_{+5,71} - 0.6987 \cdot P(6-8)_{-5,64} + \\ & + 1.462 \cdot INV(P_{\text{фев}}, T3-5)_{+5,24} - 153.9; R^2 = 0.756 \text{ (Degr} = 7.3\%), P < 10^{-6}. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Здесь $I \cdot T(3-4)$ – средняя многолетняя температура марта и апреля для зоны дерново-подзолистых почв, $P(6-8)$ – сумма осадков лета, $INV(P_{фев}, T_{3-5})$ – стабильное в пространстве сочетание осадков февраля и температуры весны. Инвариант $INV(P_{фев}, T_{3-5})$ есть линейная комбинация $P_{фев} + a \cdot (2 \cdot T_{3-5_{ср}} - T_{3-5})$ для такого a , при котором коэффициент вариации этой комбинации минимален (Рис. 5.2 справа). Согласно работе (Шарый, 2010), этот минимум в обычных условиях всегда существует и является единственным; там же дана формула для его расчета; в данном случае он равен 3,313.

Модель (5.3) объясняет 76% изменчивости прибавки. Однако в модели (5.1) и (5.2) температура вообще не входила, в отличие от (5.3). Прогнозируемая прибавка к урожаю озимой пшеницы будет наибольшей на хорошо освещенных склонах ($+F(35, 230)$) в тех частях региона, где относительно низкие осадки лета ($-P(6-8)$), но высокие $P_{фев}$ и температуры весны ($+INV(P_{фев}, T_{3-5})$). В зоне дерново-подзолистых почв дополнительно важны высокие средние многолетние температуры марта и апреля ($+I \cdot T(3-4)$).

Прогнозируемая моделью (5.3) к 2050 г. прибавка возрастает на 25% (рост с 11,7 до 14,6 ц/га). При этом хорошо освещенные склоны будут характеризоваться средним значением прибавки 18,7 ц/га, а слабо освещенные – 11,4 ц/га (различие в 1,6 раза). Прогноз отличается и для типов почв: ожидается рост прибавки для дерново-подзолистых на 22,2 ц/га (48%), для серых лесных на 13,3 ц/га (19%), для черноземов на 10,4 ц/га (7,6%).

Таким образом, показано, что учет рельефа при выборе площадей для посева озимой пшеницы может привести к получению бóльших урожаев при изменении климата на Среднерусской возвышенности: прибавка на хорошо освещенных с юго-запада склонах возрастает в 1,6–1,9 раз по сравнению со слабо освещенными, проблема (A2). Эти факты имеют сходство с результатами, описывающими различия в продуктивности и качестве зерна озимой пшеницы при изменении ориентации ее листьев (Петрова, Ерошенко, 2006). Эти авторы связывают свой результат с изменениями структуры фотосинтетического аппарата под влиянием изменения количества солнечной радиации, что отвечает изменению освещенности в нашем исследовании. Также обнаружено, что использование метода инвариантов (Шарый, 2010) позволяет ввести в модель важную для урожаев хронологическую последовательность зависимых показателей климата, проблема (A9).

ВЫВОДЫ

1. Известная система типов местоположений (Глазовская, 1964), основанная только на характеристиках профиля склона, усовершенствована с целью учета изменений склонов в плане и экспозиций. Предложен общий подход для расчета модифицированных типов местоположений. Установлено, что катенарные сопряжения на равнине в гумидном регионе в большей степени формируются поверхностным стоком, а в полуаридном низкогорном – формами рельефа, то есть специфика катенарных сопряжений определяется особенностями рельефа и климата региона. Проверено, что модифицированные типы местоположений в существенной мере определяют пространственную дифференциацию

цию характеристик лесных экосистем. Поскольку принцип катенарных сопряжений не меняется со временем, предложенные модели модифицированных типов местоположений, наряду с характеристиками рельефа, могут служить одной из опорных составляющих ландшафтно-экологического прогнозного картографирования.

2. Модели и карты гидротермических условий базового периода, важных для дифференциации свойств экосистем, строятся при использовании в качестве факторов среды модифицированных типов местоположений, характеристик рельефа и индикаторной переменной, выделяющей плакоры. Такие модели следует верифицировать, после чего они могут играть важную роль в расчете прогнозных карт показателей экосистем.

3. Установлено, что в полуаридных условиях южной лесостепи (Самарская Лука) ведущим прямым фактором пространственных изменений функциональных и структурных состояний являются летние запасы продуктивной влаги в почве, а в гумидных условиях юга подтаежной зоны (Приокско-Террасный заповедник) – почвенные температуры. Показано, что для построения прогнозных карт недостаточно одного лимитирующего фактора, но учет совместного действия различных факторов значительно надежнее описывает изменение экосистем в пространстве и во времени.

4. Крупномасштабные прогнозные карты характеристик лесных экосистем являются частично верифицированными, если для их расчета используются пространственные модели характеристик базового периода, успешно прошедшие верификацию по принятым критериям.

5. Предложено усовершенствование методики расчета количественных характеристик устойчивости лесных экосистем – индексов резистентной $I_{рез}$ и упругой $I_{упр}$ устойчивости (Коломыц, 1993), учитывающее различный вклад скоростей синтеза и деструкции. Показано, что эти индексы являются одними из ведущих предикторов дифференциации прогнозируемых структурных и функциональных изменений.

6. Разработан подход и сформирована среднемасштабная карта запасов углерода на базовый период и карта изменения запасов углерода по климатическому сценарию HadCM3 A2 на 2075 г. для лесных экосистем Окского бассейна. Анализ региональной модели изменения баланса углерода показал, что климатогенные сдвиги в лесных формациях способны приводить в одних ландшафтно-экологических условиях к депонированию углерода, в других – к его эмиссии. По результатам моделирования, к прогнозируемому сроку депонирование углерода в лесах бассейна составит 9,8% от базового содержания углерода, эмиссия 6,9%. Эта модель показывает, что наиболее заметное депонирование углерода могут реализовать вторичные леса на месте еловых и широколиственно-еловых, а также сосновые и широколиственно-сосновые леса. Существенную эмиссию можно ожидать во вторичных лесах на месте сосновых и широколиственно-сосновых. При этом еловые, широколиственные, болотные и пойменные леса дадут вклад в депонирование, вторичные на месте сосновых и смешанных лесов – в эмиссию.

7. Прогнозные карты на 2050 г. по климатическому сценарию GISS E прибавки к урожаю озимой пшеницы за счет внесения удобрений на территории Среднерусской возвышенности построены по моделям, учитывающим, помимо климата и почв, рельеф. Во все модели вошла освещенность склонов мезорельефа как главный фактор изменения урожайности в пространстве. Предложен способ введения в регрессионные модели важных для урожаев хронологически последовательных климатических факторов с помощью нового фактора, *климатического инварианта*, составленного из осадков февраля и температуры весны, которые не могли быть использованы ранее из-за тесной связи между ними. Три построенные модели прогнозируют рост прибавки на 12–25%. Пространственная гетерогенность урожайности существенна: на более освещенных с юго-запада склонах прибавка ожидается в 1,6–1,9 раз выше, чем на менее освещенных склонах. Эти различия могут быть важны при планировании посевных площадей в условиях возможного продовольственного кризиса, ожидаемого на планете после 2050 г.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность проф. Э.Г. Коломыцу за данные для анализа и плодотворное сотрудничество, д.б.н. П.А. Шарому за программы и многочисленные обсуждения, директору Института член-корр. РАН Г.С. Розенбергу за поддержку исследований, д.б.н. О.В. Рухович и д.т.н. С.А. Барталеву за предоставленные ими данные.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Коломыц, Э.Г. Влияние геотермической энергии на лесообразование в островном вулканическом ландшафте / Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая**, Н.А. Сурова // География и природные ресурсы. – 2016. – № 4. – С. 29–40.
2. Коломыц, Э.Г. Количественная оценка функциональной устойчивости лесных экосистем / Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая** // Экология. – 2015. – № 2. – С. 83–94.
3. Коломыц, Э.Г. Аналитические и картографические модели функциональной устойчивости лесных экосистем / Э.Г. Коломыц, А.С. Керженцев, **Л.С. Шарая** // Успехи современной биологии. – 2015. – Т. 135. – № 1. – С. 127–148.
4. Шарый, П.А. Роль зон аккумуляции в пространственном распределении почв и эколого-ценотических групп / П.А. Шарый, **Л.С. Шарая**, В.Н. Коротков // Лесоведение. – 2015. – № 5. – С. 346–358.
5. Шарый, П.А. Изменение NDVI лесных экосистем Северного Кавказа как функция рельефа и климата / П.А. Шарый, **Л.С. Шарая** // Лесоведение. – 2014. – № 5. – С. 83–90. На английском языке: Shary, P.A. Change of NDVI in Northern Caucasus as related to topography and climate / P.A. Shary, **L.S. Sharaya** // Contemporary Problems of Ecology. – 2014. – V. 7. – N. 6. – P. 687–693.
6. Коломыц, Э.Г. Устойчивость лесных экосистем, методы ее исчисления и картографирования / Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая** // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16. – № 1. – С. 93–107.

7. Kolomyts, E.G. Sustainability of forest ecosystems and biotic regulation of the carbon cycle / E.G. Kolomyts, **L.S. Sharaya** // Environmental Research Journal. – 2014. – V. 8. – N. 2. – P. 133–179.
8. Коломыц, Э.Г. Методы исчисления и картографирования устойчивости лесных экосистем / Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая** // Известия Российской академии наук. Серия геогр. – 2013. – № 6. – С. 133–143.
9. **Шарая, Л.С.** Прогнозное картографирование лесных экосистем (ландшафтно-экологический подход) / Л.С. Шарая // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15. – № 3. – С. 38–47.
10. Шарый, П.А. Метод оценки стабильных сочетаний характеристик урожайности / П.А. Шарый, О.В. Рухович, **Л.С. Шарая**, Ф.Д. Рухович // Плодородие. – 2012. – № 5(68). – С. 41–42.
11. Kolomyts, E.G. Analytical and cartographic predictive modeling of carbon balance in temperate forest ecosystems under global warming / E.G. Kolomyts, G.S. Rozenberg, **L.S. Sharaya** // International Journal of Ecological Economics and Statistics. – 2012. – V. 24. – N. 1. – P. 27–45.
12. Kolomyts, E.G. Carbon balance in forest ecosystems and biotic regulation of carbon cycle under global warming: Landscape-ecological predictive modeling / E.G. Kolomyts, **L.S. Sharaya**, N.A. Surova // International Journal of Ecosystems. – 2012. – V. 2. – N. 6. – P. 148–172.
13. Коломыц, Э.Г. Первичная биопродуктивность горных ландшафтов в системе региональных связей (на примере Большого Кавказа) / Э.Г. Коломыц, Н.А. Сурова, **Л.С. Шарая** // География и природные ресурсы. – 2012. – № 2. – С. 5–14.
14. Коломыц, Э.Г. Прогнозное моделирование высокогорных экосистем в свете глобальных изменений климата / Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая** // Экология. – 2012. – № 1. – С. 3–18.
15. Kolomyts, E.G. Carbon balance of forest ecosystems under global warming: landscape-ecological predictive modeling / E.G. Kolomyts, G.S. Rozenberg, **L.S. Sharaya** // Geography, environment, sustainability. – 2011. – V. 4. – N. 1. – P. 69–85.
16. Шарый, П.А. Методология анализа пространственной изменчивости характеристик урожайности пшеницы в зависимости от условий агроландшафта / П.А. Шарый, О.В. Рухович, **Л.С. Шарая** // Агрохимия. – 2011. – № 2. – С. 57–81.
17. Коломыц, Э.Г. Опыт регионального моделирования устойчивости лесных экосистем (на примере Окского бассейна) / Э.Г. Коломыц, А.С. Керженцев, **Л.С. Шарая** // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13. – № 5. – С. 9–18.
18. Розенберг, Г.С. Изменение углеродного баланса в лесных экосистемах при глобальном потеплении / Г.С. Розенберг, Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая** // Известия Российской академии наук. Серия географич. – 2011. – № 4. – С. 42–53.
19. Розенберг, Г.С. Углеродный баланс и устойчивость лесных экосистем при глобальном потеплении (опыт прогнозного моделирования) / Г.С. Розенберг, Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая** // Успехи современной биологии. – 2011. – Т. 131. – № 4. – С. 367–381.
20. Коломыц, Э.Г. Высокогорные экосистемы в условиях предстоящего глобального потепления (прогнозное эмпирико-статистическое моделирование) / Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая** // Успехи современной биологии. – 2011. – Т. 131. – № 6. – С. 587–605.

21. **Шарая, Л.С.** Изучение пространственной организации лесных экосистем с помощью методов геоморфометрии / **Л.С. Шарая**, П.А. Шарый // *Экология*. – 2011. – № 1. – С. 3–10.
22. Рухович, О.В. Использование характеристик рельефа при анализе пространственной изменчивости урожайности озимой пшеницы в Окском бассейне / О.В. Рухович, **Л.С. Шарая**, П.А. Шарый // *Агрохимия*. – 2010. – № 8. – С. 49–57.
23. Коломыц, Э.Г. Прогнозное моделирование углеродного баланса лесных экосистем Волжского бассейна при глобальном потеплении / Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая**, Н.А. Сурова // *География и природные ресурсы*. – 2010. – № 1. – С. 9–18.
24. Рухович, О.В. Опыт прогнозирования характеристик урожая озимой пшеницы на агроландшафтах Окского бассейна с помощью методов геоморфометрии / О.В. Рухович, **Л.С. Шарая**, П.А. Шарый, В.А. Романенков // *Плодородие*. – 2009. – № 5(50). – С. 22–24.
25. Коломыц, Э.Г. Ландшафтно-экологические прогнозные модели углеродного баланса в лесных экосистемах при глобальном потеплении / Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая** // *Успехи современной биологии*. – 2009. – Т. 11. – № 1(7). – С. 1481–1487.
26. Коломыц, Э.Г. Прогноз влияния глобального потепления на локальные экосистемы зонального экотона леса и степи / Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая**, Н.А. Сурова // *Проблемы региональной экологии*. – 2009. – № 6. – С. 200–210.
27. Коломыц, Э.Г. Методы ландшафтной экологии в прогнозных оценках биотической регуляции углеродного цикла при глобальном потеплении / Э.Г. Коломыц, Г.С. Розенберг, **Л.С. Шарая** // *Экология*. – 2009. – № 6. – С. 403–410.
28. **Шарая, Л.С.** Связь абиотических и биотических характеристик лесной экосистемы Жигули / Л.С. Шарая, П.А. Шарый // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2009. – Т. 11. – № 1. С. 22–30.
29. **Шарая, Л.С.** Предсказательное картирование лесных экосистем в геоэкологии / Л.С. Шарая // *Поволжский экологический журнал*. – 2009. – № 3. – С. 249–257.
30. **Шарая, Л.С.** Количественный анализ пространственной изменчивости некоторых параметров состояния экосистемы Жигули / Л.С. Шарая // *Бюллетень Самарская Лука*. – 2007. – Т. 16. – № 4(22). – С. 639–659.
31. Shary, P.A. The problem of scale-specific and scale-free approaches in geomorphometry / P.A. Shary, **L.S. Sharaya**, A.V. Mitusov // *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. – 2005. – V. 28. – N. 1. – P. 81–101.
32. **Шарая, Л.С.** Анализ аварийных разливов нефти на суше и ситуационные игры для уменьшения экологических рисков / Л.С. Шарая, П.А. Шарый // *Известия Самарского научного центра РАН, спец. выпуск «Актуальные проблемы экологии»*. – 2005. – Вып. 4. – С. 323–332.
33. **Шарая, Л.С.** Элементарные формы в классификациях рельефа, их связь с характеристиками ландшафта Приокско-Террасного заповедника / Л.С. Шарая, П.А. Шарый // *Известия Самарского научного центра РАН, спец. выпуск «Природное наследие России»*. – Часть 1. – 2004. – С. 102–111.
34. **Шарая, Л.С.** Использование морфометрических статистик для описания внутренней геометрии равнинных и горных местностей / Л.С. Шарая, П.А. Шарый // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2003. – Т. 5. – № 2. – С. 278–286.
35. Shary, P.A. Fundamental quantitative methods of land surface analysis / P.A. Shary, **L.S. Sharaya**, A.V. Mitusov // *Geoderma*. – 2002. – V. 107. – N. 1–2. – P. 1–32.

Другие публикации:

36. Коломыц, Э.Г. Биосферный заповедник как объект регионального и глобального геосистемного мониторинга / Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая**, Н.А. Сурова // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2016. – Т. 25. – № 1. – С. 18–57.

37. Shary, P.A. Analytical and cartographic predictive modeling of arable land productivity / P.A. Shary, O.V. Rukhovich, **L.S. Sharaya** // L. Mueller, A.K. Sheudshen, F. Eulestein (Eds.). Novel Methods for Monitoring and Management Land and Water Resources in Siberia. – Heidelberg: Springer, 2015. – Chapter 21. – P. 489–502.

38. Kolomyts, E.G. Sustainability of forest ecosystems and biotic regulation of the carbon cycle / Kolomyts E.G., **Sharaya L.S.** // J.A. Daniels (Ed.) Advances in Environmental Research, 2014. – V. 31. – P. 133–180.

39. Kolomyts, E.G. Forests of Volga River Basin under Global Warming (Landscape-Ecological Analysis and Prognosis) / Kolomyts E.G., Rozenberg G.S., Saksonov S.V., **Sharaya L.S.** Nova Science Publishers, 2012. – 412 pp.

40. Шарый, П.А. Предсказательное моделирование характеристик урожая озимой пшеницы / Шарый П.А., Рухович О.В., **Шарая Л.С.** // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. – М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2012. – С. 310–326.

41. Залиханов, М.Ч. Высокогорная геоэкология в моделях / М.Ч. Залиханов, Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая**, Н.Л. Цепкова, Н.А. Сурова – М.: Наука, 2010. – 487 с.

42. Розенберг, Г.С. Углеродный баланс лесных экосистем в условиях предстоящего потепления / Г.С. Розенберг, Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая** // География продуктивности и биогеохимического круговорота в наземных экосистемах. – М.: Институт географии РАН, 2010. – С. 126–139.

43. **Шарая, Л.С.** Крупномасштабное картирование параметров экосистем в современном и прогнозируемом состояниях / Л.С. Шарая // Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. – Раздел 7.7. – М.: Наука, 2008. – С. 172–173.

44. Зинченко, Т.Д. Значение рельефа в оценке гидробиологического состояния малых рек / Т.Д. Зинченко, П.А. Шарый, **Л.С. Шарая**, В.К. Шитиков, Э.В. Абросимова // О.В. Бухарин, Г.С. Розенберг (ред.) Биоиндикация экологического состояния малых рек. – М.: Наука, 2007. – Гл. 2, раздел 2.2. – С. 65–77.

45. **Шарая, Л.С.** О связях растительности и почв с пространственными градиентами климатических параметров / Л.С. Шарая // Коломыц, Э.Г. Бореальный экотон и географическая зональность. Атлас-монография. – М.: Наука, 2006. – Раздел 6.3. – С. 319–325.

46. Шарый, П.А. О методологии использования рельефа в исследованиях ландшафта / Шарый П.А., **Шарая Л.С.** // Теоретические проблемы экологии и эволюции (Четвертые Люблинские чтения). – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2005. – С. 238–246.

Материалы конференций:

47. Шарый, П.А. Роль и описание рельефа при изучении закономерностей пространственной организации ландшафтов / П.А. Шарый, О.В. Рухович, **Л.С. Шарая** // Материалы Международной научной конференции «Биологические ресурсы и устойчивое развитие». Пушино 29 окт. – 2 ноябр. 2001 г. – Пушино: Изд-во НИА-Природа, 2001. – С. 250.

48. **Шарая, Л.С.** Аналитические ситуационные игры для уменьшения экологических рисков / Л.С. Шарая, П.А. Шарый // Материалы международной конференции «Природное наследие России: изучение, мониторинг, охрана», г.Тольятти, Россия (21-24 сентября 2004 г.). – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2004. – С. 297–299.

49. **Шарая, Л.С.** Элементарные формы в классификациях рельефа, их связь с характеристиками ландшафта Приокско-Террасного заповедника (предварительное сообщение) / Л.С. Шарая, П.А. Шарый // Материалы международной конференции «Природное наследие России: изучение, мониторинг, охрана», г.Тольятти, Россия (21-24 сентября 2004 г.). – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2004. – С. 297.

50. Шарый, П.А. Предсказательное картирование: количественные методы индикации свойств ландшафта с использованием геоморфометрии / Шарый П.А., **Шарая Л.С.** // XI международная ландшафтная конференция «Ландшафтоведение – теория, методы, региональные исследования, практика», 22-25 августа 2006 г., г.Москва. Материалы XI международной ландшафтной конференции. – М.: Географический факультет МГУ, 2006. – С.76–77.

51. Коломыц, Э.Г. Локальные механизмы функциональных изменений лесных геосистем и биотической регуляции углеродного цикла при глобальном потеплении / Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая** // XIII научное совещание географов Сибири и Дальнего Востока (Иркутск, 27-29 ноября 2007 г.). – Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. – С. 126–129.

52. **Шарая, Л.С.** Пространственная организация лесной экосистемы Жигули / Л.С. Шарая // Материалы Национальной конференции с международным участием «Математическое моделирование в экологии» (Пушино, 1–5 июня 2009 г.). – С. 306–307.

53. Коломыц, Э.Г. Ландшафтно-экологические прогнозные модели углеродного баланса в лесных экосистемах при глобальном потеплении / Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая** // Мат. Национальной конференции с международным участием «Математическое моделирование в экологии» (Пушино, 1–5 июня 2009 г.). – С. 133–135.

54. Розенберг, Г.С. Углеродный баланс лесных экосистем в условиях предстоящего потепления / Г.С. Розенберг, Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая** // «География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов: к 100-летию профессора Н.И. Базилевич». Ред.: Г.В. Добровольский, В.Н. Кудеяров, А.А. Тишков. Мат-лы конф., (Пушино, Московская область, 19–22 апреля 2010 г.). – М.: Институт географии РАН, 2010. – Часть 1. – С. 126–140.

55. Рухович, О.В. Анализ эффективности внесения удобрений на урожай озимой пшеницы методами геоморфометрии / О.В. Рухович, **Л.С. Шарая**, Д.И. Рухович, П.А. Шарый // «Плодородие почв – основа устойчивого развития сельского хозяйства» - Материалы Международной научно-практической конференции и IV съезда почвоведов (Минск, 26-30 июля 2010 г.). – Минск: Национальная академия наук Беларуси, Институт почвоведения и агрохимии, Белорусское общество почвоведов, 2010. – С. 176.

56. Розенберг, Г.С. Прогнозное ландшафтно-экологическое моделирование углеродного баланса в лесных экосистемах при глобальном потеплении / Г.С. Розенберг, Э.Г. Коломыц, **Л.С. Шарая** // Мат. международной научной конференции «Резервуары и потоки углерода в лесных и болотных экосистемах бореальной зоны». – Сыктывкар, 26-30 сентября 2011 г. – С. 55–56.

57. Шарый, П.А. Предсказательное моделирование и прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур / П.А. Шарый, Д.Л. Пинский, О.В. Рухович, **Л.С. Шарая** // Материалы докладов VI Съезда общества почвоведов им. В.В. Докучаева. Книга 1. – Петрозаводск, 13-18 августа 2012. – С. 346–348.

58. Шарый, П.А. Стабильные сочетания характеристик урожайности / П.А. Шарый, О.В. Рухович, **Л.С. Шарая**, Ф.Д. Рухович // Материалы всероссийской конференции учреждений-участников Географической сети опытов с удобрениями 26-27 июня 2012 года «Состояние и пути повышения эффективности исследований в системе Географической сети опытов с удобрениями». – М.: Всероссийский НИИ агрохимии, 2012. – С. 212–219.

59. Shary, P.A. Soils and topography: accumulation zones and non-local approaches / P.A. Shary, O.V. Rukhovich, **L.S. Sharaya**, A.V. Mitusov // Transactions of 17-th World Congress of Soil Science, “Soil Science: Confronting New Realities in the 21-st Century”, held in Bangkok, Thailand, August 14-21, 2002. – Volume IV. Symposium 48: “Development in soil data processing”, Paper No.2310. – Full paper: P.2310-1 – 2310-11, Abstract: P. 1493.

60. Shary, P.A. Geomorphometric differences between mountainous and gently sloping territories / P.A. Shary, **L.S. Sharaya** // 32nd International Geological Congress, Florence, Italy, August 20-28, 2004. – P. 89.

61. Shary, P.A. Predictable and terrain-specific landform classifications / P.A. Shary, **L.S. Sharaya** // International Symposium on Terrain Analysis and Digital Terrain Mapping (TADTM 2006), held November 23-25 in Nanjing, China. – Proceedings of TADTM, 2006. – P. 61. – Full paper: CD-ROM.

62. Pastukhov, A.V. The spatial distribution of SOC in the forest tundra of the European North-East / A.V. Pastukhov, D.A. Kaverin, **L.S. Sharaya**, P.A. Shary // Tenth International Conference on Permafrost (TICOP). Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World. - Conference held in Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, Russia, June 25-29, 2012. – V. 4, Extended Abstracts. – P. 443.

63. Шарый, П.А. Изменение NDVI лесных экосистем Северного Кавказа как функции климата и рельефа / П.А. Шарый, **Л.С. Шарая**, Д.Л. Пинский // Аэрокосмические методы и Геоинформационные технологии в лесоведении и сельском хозяйстве. Доклады V Всероссийской конференции (с международным участием), посвященной памяти выдающихся ученых-лесоведов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина. – Москва, 2013. – С. 232–236.

64. Коломыц, Э.Г. Аналитические и картографические модели функциональной устойчивости лесных экосистем / Э.Г. Коломыц, А.С. Керженцев, **Л.С. Шарая** // Материалы Всероссийской научной конференции «Научные основы устойчивого управления лесами». – Москва, 21–23 октября 2014 г. – С. 107–108.

65. **Шарая, Л.С.** Прогнозные оценки урожайности озимой пшеницы с учетом рельефа, климата и почв для Среднерусской возвышенности / Л.С. Шарая, П.А. Шарый // Тенденции развития науки и образования. Сборник научных трудов по материалам IX международной научно-практической конференции 25 декабря 2015 г. – Самара: Изд-во НИЦ «Л-Журнал», 2015. – С. 68–74.