

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 574.45;911.52;58.02;58.05

ЛИТОГЕННАЯ ОСНОВА ЛАНДШАФТОВ КАК ФАКТОР ПРИРОСТА ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО (*QUERCUS ROBUR* L.) В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРА РУССКОЙ РАВНИНЫ)

© 2025 г. О. С. Железнова^{1,*}, С. А. Тобратов¹

¹Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, Рязань, Россия

*e-mail: zheleznova_rzn@mail.ru

Поступила в редакцию 22.01.2025 г.

После доработки 04.05.2025 г.

Принята к публикации 03.06.2025 г.

В настоящей работе проанализированы закономерности радиального прироста дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в зональных и интразональных ландшафтах широколиственных лесов и подтайги центра Русской равнины. Хронологии построены для 5 местообитаний, расположенных в контрастных геолого-геоморфологических условиях. Средний радиальный прирост дуба в пределах территории исследования различается в 1.9 раза (1.45–2.74 мм/год), при этом максимальный прирост характерен для пойменных дубрав. С помощью корреляционного анализа в скользящем окне выявлено, что для рассматриваемых хронологий характерно нарушение стационарности связей в системе “климат–прирост древостоев”. Выявлен принципиальный рост увлажненности региональных ландшафтов, начавшийся в 1970-е годы (особенно характерный для осадков сентября–марта), который имел неоднозначные последствия для функционирования дубовых древостоев. В условиях Среднерусской возвышенности, где сочетание ландшафтных факторов обуславливает более высокую дренированность, реакция прироста дуба на возросшее увлажнение была положительной, а главным лимитирующим фактором прироста является засуха. В менее дренированных местообитаниях (Салтыковский прогиб и Мещёрская низменность) возросшее увлажнение оказало негативное воздействие на прирост. Минимальная биопродуктивность (в 1.5 раза ниже зональных значений) зафиксирована в дубовых древостоях Лужковской впадины (Салтыковский прогиб, светло-серые лесные почвы), а не на низкотрофных песчаных субстратах Мещёры: фактор рельефа и геологического строения оказался важнее фактора субстрата. Факторы наиболее резкого снижения прироста охарактеризованы методом реперных лет. Полученные результаты показывают, что с 1970-х годов лимитирующим прирост фактором в большинстве изученных ландшафтных обстановок стал избыток увлажнения, но климатический сигнал существенно трансформировался литогенной основой ландшафтов и не может быть адекватно интерпретирован без ее учета.

Ключевые слова: дендрохронология, дуб черешчатый, ландшафтная структура, нестационарность связей в системе “климат–прирост”, реперные годы, факторы прироста древостоя

DOI: 10.7868/S2658697525040053

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Реакция роста деревьев на текущие климатические изменения, в том числе общемировая тенденция повышенной смертности и уменьшения радиального прироста — актуальная задача, которой посвящены многие исследования (Экосистемы ..., 2004; Diers et al., 2023; Kasper et al., 2022; Van Mantgem et al., 2009; и др.). Особое внимание уделяется проблеме состояния дубрав. Дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) —

вид, толерантный к широкому спектру эдафических условий, умеренно устойчивый к засухе и неустойчивый к переувлажнению: он выдерживает кратковременное затопление (в поймах рек), но постоянного и застойного увлажнения не переносит (Рысин, Рысина, 1990; Niinemets and Valladares, 2006). Глубина и морфология корневой системы дуба отражает особенности почвенно-гидрологических условий и приспособлена к поддержанию оптимального водного режима: в пойменных условиях глубина

корневой системы не превышает 2 м, в нагорных дубравах может быть более 10 м (Иванов, 1991; Романовский, Мамаев, 2002; Vospernik et al., 2023).

Несмотря на относительную устойчивость дуба к засухе, есть неблагоприятные прогнозы снижения его прироста в Центральной Европе при аридизации климата (Scharnweber et al., 2020). В европейской части России наряду с уменьшением общей площади, занятой дубравами, в последние десятилетия наблюдается ухудшение жизненного состояния дуба, упрощение состава и структуры сообществ, снижение их полноты (Смирнов, 2004). К факторам, снижающим прирост дуба, обычно относят весенние и летние засухи, морозы, поздневесенние заморозки, деятельность листогрызущих насекомых (Хасанов, Сакулина, 2017; Экосистемы ..., 2004; Scharnweber et al., 2020; Vospernik et al., 2023).

В условиях бореального экотона Русской равнины, в “зоне гидротермического перелома”, где влага является критическим компонентом ландшафта (Коломыц, 2003), ключевым фактором биологической продуктивности сообществ может быть характер увлажнения. При этом количество осадков, обычно используемое в качестве предиктора прироста древостоев, — это влага на “входе” в ландшафт. Однако влияние сумм осадков на прирост опосредуется местными эдафическими факторами, вследствие чего даже в водораздельных условиях такое влияние может быть статистически недостоверным, а характер связи прироста и увлажнения может принципиально различаться, даже при близких значениях количества осадков (Боков, Смирнов, 2019; Коломыц, 2010).

К сожалению, влияние ландшафтной структуры территории, в том числе неоднородностей литогенной основы, на функционирование растительных сообществ изучено крайне слабо. Большинство работ посвящено выделению в древесно-кольцевых хронологиях регионального климатического сигнала (Соломина и др., 2016; Хасанов, Сакулина, 2017; Diers et al., 2022). Это, безусловно, необходимо для прогнозных оценок реакции древостоев на климатическую динамику в масштабах крупных регионов. В то же время механизмы ответа на глобальные изменения зарождаются на локальном уровне (Коломыц, 2003), где наблюдается уникальное сочетание ландшафтных факторов, способных трансформировать климатический сигнал.

Цель настоящей работы — используя методы дендрохронологии, оценить радиальный прирост *Q. robur* в ландшафтах центра Русской равнины и выявить ландшафтно-климатические факторы, его определяющие.

Гипотеза нашего исследования заключается в том, что существенное влияние на поле продуктивности древостоев оказывает литогенная основа ландшафтов. Поэтому даже в пределах небольшой территории, неоднородной по литогенетическим условиям, может наблюдаться контрастная и асинхронная реакция прироста дубовых древостоев на климатическую динамику, при этом адекватная интерпретация такой реакции может быть дана на основе ландшафтного подхода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследований площадью свыше 6000 км² приурочен к одному из контрастных ландшафтных узлов Русской равнины — границе Среднерусской возвышенности, Окско-Донской равнины и Мещёрской низменности (рис. 1). В течение 2022–2023 гг. нами были обследованы лесные сообщества в пределах ряда региональных ландшафтов (в природных зонах подтайги, широколиственных лесов и поймы Оки), которые существенно отличаются историей развития рельефа, что, в частности, проявляется в закономерном изменении средней высоты междуречий, густоты и глубины эрозионного расчленения (Кривцов и др., 2011).

В соответствии с теоретическими основами регионального ландшафтоведения (научная школа Н.А. Солнцева) в данном сообщении под литогенной основой понимается вся совокупность геоматических факторов и компонентов ландшафтов вместе с их историей и происхождением (генезисом) — в той части, в какой это необходимо для понимания текущих процессов вещественно-энергетического обмена (включая биопродуктивность). В такой трактовке литогенная основа, как самый “сильный” компонент (и одновременно ландшафтообразующий фактор), включает современный рельеф, вещественный состав и гранулометрию почвообразующих пород, стратиграфию и литологию четвертичных и отчасти коренных пород, глубину залегания и морфологию водоупорных горизонтов, а также новейшие и современные тектонические движения (Анненская и др., 1981; Масляев, 2008; Солнцев, 2001, 2013).

Тектоническая структура при этом рассматривается как составная часть литогенной основы, определяющая возраст и генезис рельефа, обособление морфоструктурных неоднородностей и наличие активных ландшафтных рубежей, где концентрируется действие флювиальных процессов. Так, к “ослабленной зоне” (Философов, 1960) между основными региональными морфоструктурами приурочена пойма р. Оки — самая низкая ступень современного рельефа, в конту-

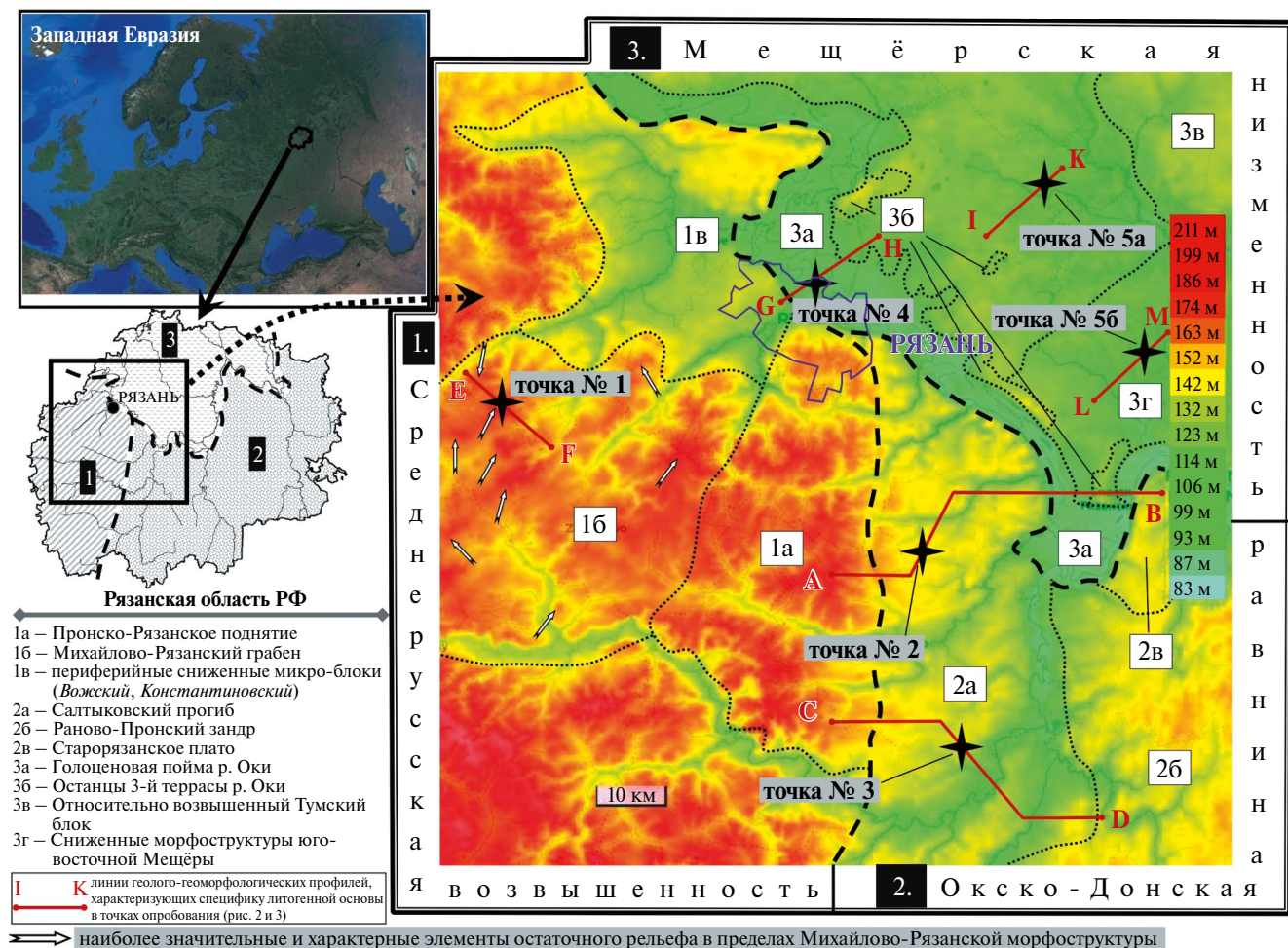


Рис. 1. Расположение района исследований и его геоморфологическая структура.

рах которой расположена одна из точек дендрохронологического опробования (см. рис. 1). В плиocene и раннем квартере долины Оки еще не существовало, а сток был локализован в субмеридиональных Кривоборской и Белогорской палеодолинах в пределах Салтыковского прогиба (рис. 2). С начала эоплейстоцена территория прогиба была вовлечена в дифференцированное поднятие (Государственная ..., 2021), причем северная часть (особенно Гребневский выступ) воздымалась интенсивнее, а центральная — отставала в поднятии. До конца эоплейстоцена поднятие влияло на конфигурацию речной сети, но не приводило к ее коренной перестройке, о чем свидетельствует antecedentный участок Белогорской долины в восточной части Гребневской структуры (см. рис. 2). Но в начале неоплейстоцена активизация опускания Мещёрской структурной террасы (Государственная ..., 2021), средняя скорость которого рядом авторов оценивается в 0.5 мм/год (Анненская и др., 1981; Асеев, Веденская, 1962), обусловила формирование окской долины и изменение направления стока.

В то же время рельеф большей части рязанского участка Среднерусской возвышенности более древний: его общие особенности (холмисто-увалистый характер и локализация междуречий, густота и глубина эрозионного расчленения) не претерпели существенных изменений с позднего палеозоя (Спиридонов, 1978) и после отступления мезозойских морей полностью восстановились в палеогене. В позднеплиоцен-четвертичное время отмечается активизация поднятий на северной периферии возвышенности, в результате которых в пределах Рязано-Михайловской морфоструктуры оформилась серия элементов остаточного рельефа (см. рис. 1), имеющих в своей основе, как правило, выступы карбонowych известняков, перекрытые мезозойскими и четвертичными образованиями (рис. 3a). В противоэрозионных целях на вершинах и приводораздельных склонах данных элементов рельефа во многих случаях целенаправленно сохранялись зональные широколиственные леса.

Современные тектонические движения в изучаемом районе отчасти унаследованы от не-

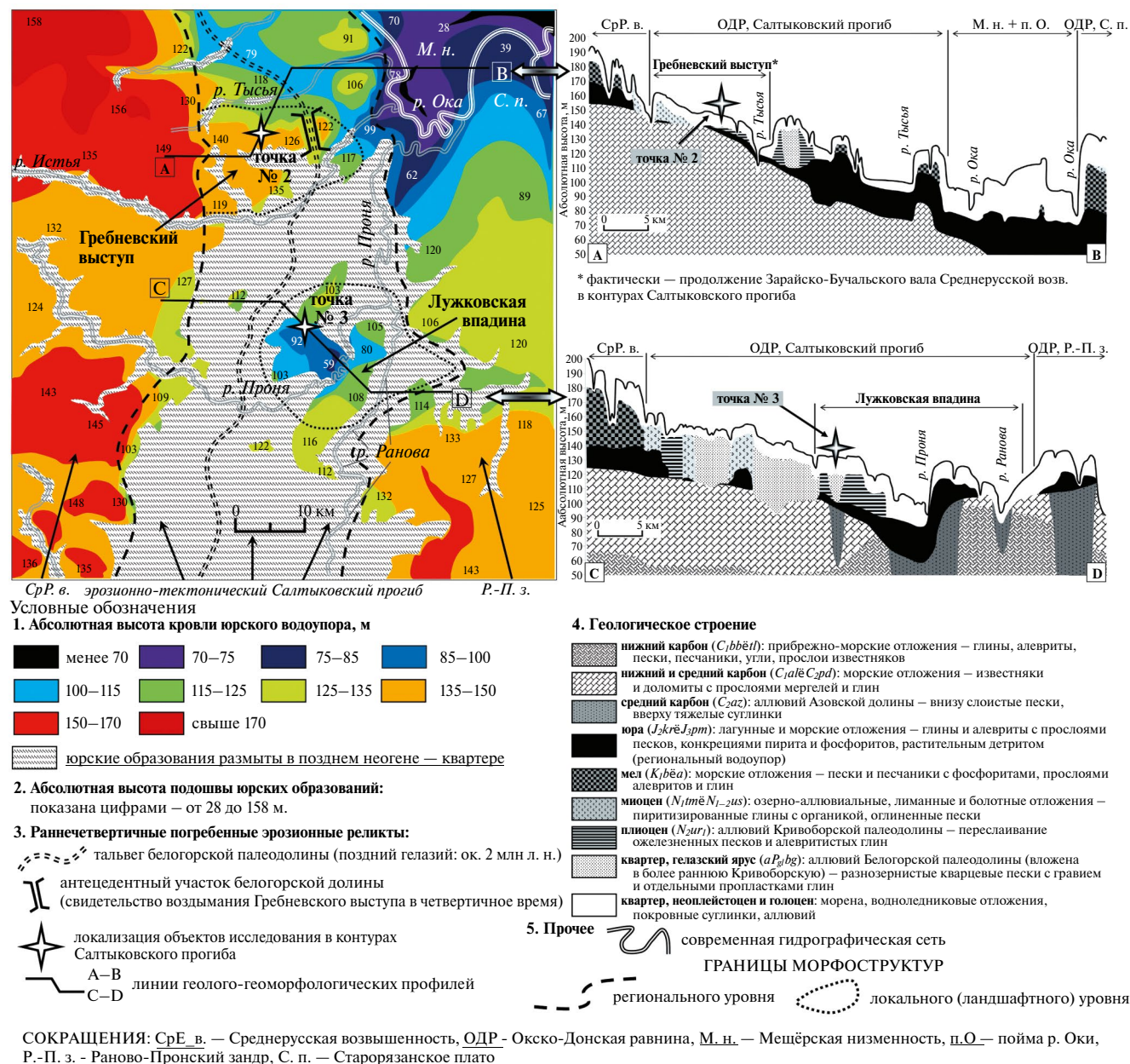


Рис. 2. Геолого-геоморфологические различия в пределах Салтыковского прогиба.

плейстоценовых и заключаются в опускании большей части Мещёрской низменности (за исключением южной периферии) и центральной части Салтыковского прогиба, слабое воздымание испытывают рязанский участок Среднерусской возвышенности и север Салтыковского прогиба (Гласко, 1984; Органова, Войлошников, 1991). Представляет интерес тектоническая неоднородность в пределах Салтыковского прогиба, сохраняющаяся с эоплейстоцена, в частности — природные особенности Лужковской впадины в его центре. Территория впадины недостаточно обеспечена данными повторного нивелирования, но имеются косвенные ландшафтные индикаторы, которые могут быть восприняты как свидетельства новейшего

и современного опускания впадины (их подробный анализ выходит за рамки настоящей публикации): это единственный участок долины Прони, где наблюдается многорукавность русла и формирование наложенной поймы (рис. 4б), вплоть до вынужденного переноса с. Лужки на более возвышенную ступень рельефа в 1926 г. Однако и в случае отсутствия связи указанных природных особенностей с тектоническим фактором Лужковская впадина является примечательной, контрастной и малоизученной неоднородностью литогенной основы, в пределах которой мы посчитали целесообразным разместить одну из точек опробования (см. рис. 1, 2, 4).

Таким образом, новейшие и современные движения в пределах района исследований неод-

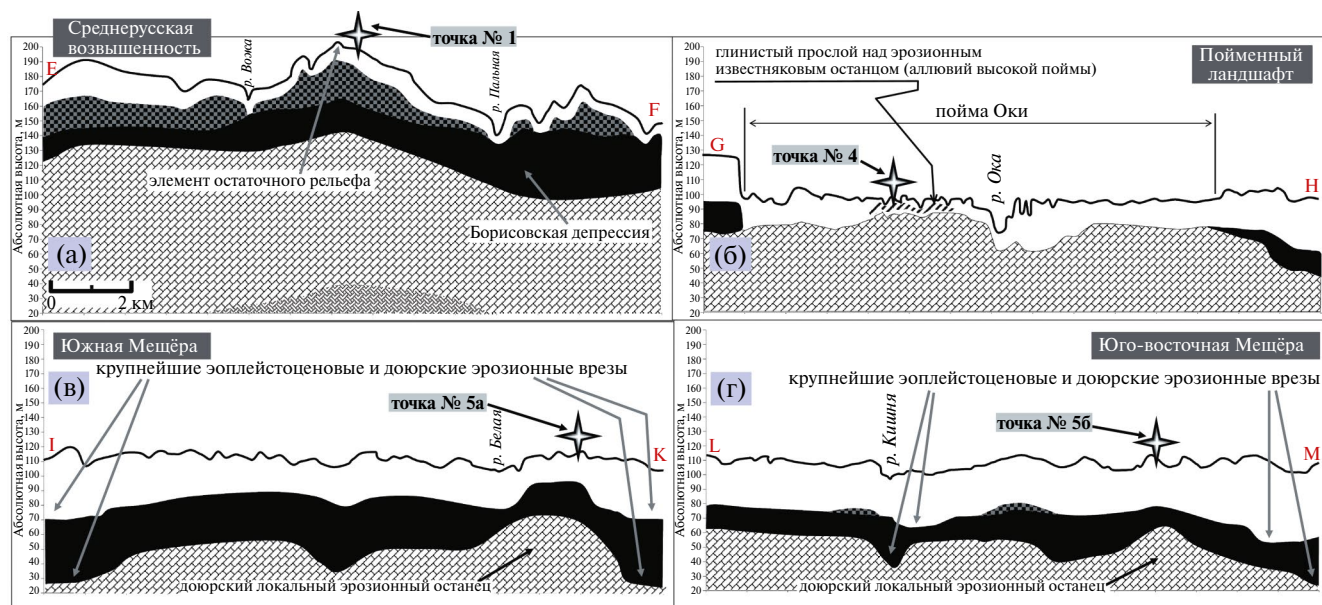


Рис. 3. Геолого-геоморфологические условия прироста дубовых древостоев по диаметру в точках опробования № 1, 4 и 5. *Примечания:* условные обозначения см. на рис. 2. Вертикальный и горизонтальный масштаб на всех профилях одинаков.

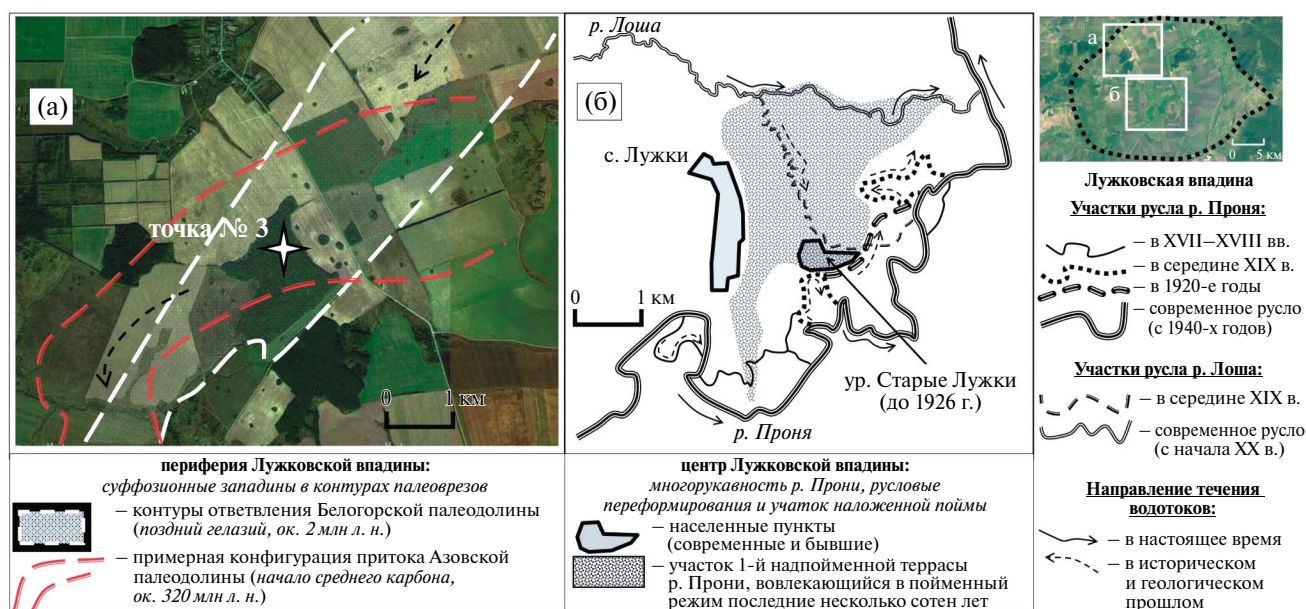


Рис. 4. Ландшафтно-гидрологические особенности Лужковской впадины.

Составлено по данным Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 200 000, 2-е изд. (2021 г.), лист N-37-XVII (Спасск-Рязанский), топографического межевого атласа Рязанской губернии А.И. Менде (1850–1860 гг.), карты Пронского уезда 1910 г., карт РККА 1924 и 1941 гг., Геоморфологической карты Рязанской области (2004 г.), топографических карт и аэрофотоснимков 1960–1990-х годов, космоснимков начала XXI в.

народны, разнонаправлены и вследствие этого обусловили обособление геофизически различных региональных и локальных морфоструктур. Это, в свою очередь, создает пространственно дифференцированный фон для проявления биоклиматических взаимосвязей.

Морфоструктурный план строения территории и ландшафтно-геофизические неоднородности в ее пределах отражает не только рельеф топографической поверхности, но и погр-

бенный рельеф. Последний, как указано нами ранее (Железнова, Тобратов, 2017), формирует локальные неоднородности гравитационного поля (Солнцев, 2013; Философов, 1960), обусловленные вещественными неоднородностями коренных пород, что в равнинных условиях способно принципиально влиять на перераспределение влаги, а также на биопродуктивность, как ландшафтный процесс, наиболее тесно с влагой связанный. Особое значение при

этом имеет морфология поверхности карбоновых известняков, как наиболее плотных пород осадочного чехла (Железнова, Тобратов, 2017). В связи с этим при выборе пунктов опробования мы учитывали данные бурения [фондовые материалы и данные, обобщенные в работе (Государственная ..., 2021)], позволяющие не только охарактеризовать генезис литогенной основы, но и дать наиболее полную характеристику ландшафтных факторов биопродуктивности (см. рис. 2 и 3).

Точка опробования № 1 приурочена к северо-восточному выступу Среднерусской возвышенности, к одному из упомянутых выше элементов остаточного рельефа (199 м), унаследованного с позднего карбона. Здесь геолого-геоморфологическое положение объекта исследований является фактором, обеспечивающим отток почвенно-грунтовых вод и снижающим вероятность переувлажнения (см. рис. 3).

Точки № 2 и 3 приурочены к Салтыковскому прогибу на западе Окско-Донской равнины. Но, несмотря на геоморфологическую общность (единая высотная ступень — 130–145 м, абсолютное господство плоских междуречий), между точками № 2 и 3 имеются литогенетические различия:

- точка № 3 приурочена к периферии воронкообразной локальной впадины с затрудненным водообменом (Лужковская впадина на рис. 2), существующей, вероятно, еще со среднего карбона, когда в ее контурах располагалось расширение Азовской долины — палеозойского предка Оки (Государственная ..., 2021);

- точка № 2 приурочена к северной части Салтыковского прогиба, к Гребневской положительной структуре (см. рис. 2), возникшей в процессе эоплейстоценового воздымания;

- уклон поверхности юрского водоупора под точкой № 2 способствует оттоку влаги, а в окрестностях точки № 3 механический состав и залегание как юрских, так и позднелипцевых пород активно ему препятствуют (точка № 3 приурочена к тальвегу притока раннечетвертичной Белогорской палеодолины, и дополнительным фактором поверхностного гидроморфизма здесь выступают оглиненные нижеурывские отложения, окружающие “воронку” белогорских песков (см. рис. 2)). На переувлажнение водоразделов указывает также большое количество приводораздельных западин в контурах Белогорской палеодолины (см. рис. 4а);

- контрастность рельефа вблизи Гребневской структуры (точка № 2) несколько выше, а абсолютная высота междуречий на 12–15 м больше, чем на периферии Лужковской впадины (точка № 3).

Точки № 5а и 5б приурочены к Мещёрской низменности. Плейстоценовая история определила ее значительную ландшафтную специфику: аккумуляцию низкотрофных песчаных субстратов, высокую заболоченность и господство подтаежных лесных сообществ с преобладанием сосняков. Дуб в пределах Мещеры распространен не повсеместно и присутствует в древостое там, где несколько выше трофность субстратов и интенсивнее местный отток влаги. Именно такие условия характерны для точек № 5а и 5б (см. рис. 3): они расположены в местах впадения притоков в пра-Оку, отмершие русла которой ныне погребены под 20–50-метровой толщей отложений неоплейстоцена. При этом обе точки приурочены к выступам и дочетвертичного, и доюрского рельефа (обойденных эоплейстоценовыми палеоврезами), то есть в условиях меньшей вероятности переувлажнения. Несмотря на то, что точки № 5а и 5б несколько различаются по абсолютной высоте междуречий и мощности плейстоценовых отложений, общие литогенетические особенности обусловили сходство хода роста дубовых древостоев в обоих пунктах опробования, вследствие чего они представлены единой хронологией.

Точка № 4 (пойменная дубрава — Луковский лес) характеризует условия современной окской поймы, которая трассирует зону максимального гравитационного потенциала на границе Среднерусской возвышенности и сниженных мещёрских морфоструктур (пойма Оки традиционно рассматривается как часть Мещёрской природной провинции). Кроме геоморфологического положения, гидроморфизму в данной экосистеме потенциально способствует водоупор среднеголоценового аллювия тяжелого состава (см. рис. 3), что, очевидно, обусловлено приуроченностью к погребенному известняковому останцу, который в среднем голоцене перекрывался не русловой, а пойменной аллювиальной фацией. Однако основным биопродукционным фактором в контурах окской поймы является режим проточности: он обеспечивает усиление оттока влаги, высокую трофность субстратов, “субтропический” характер водного режима (повышенная зимне-весенняя увлажненность с резким снижением грунтовых вод к концу лета).

В табл. 1 приведены особенности почвенно-растительного покрова изучаемых сообществ. Доля дуба в составе древостоев варьирует от 10 до 50%.

Климатические и гидрологические данные:

- средние месячные значения температуры и осадков по метеостанциям Рязань и Елатьма за 1886–2022 гг.;

Таблица 1. Ландшафтные характеристики территории исследования

№	Геоморфологические условия	Природная зона, генетический тип почв*	Формула древостоя**	Название сообщества
1	Среднерусская возвышенность, увал, приводораздельный склон (199 м)	Широколиственные леса, серые лесные среднесуглинистые почвы	3Кл3Л3Д1Яс + В	Дубо-липо-кленовник с ясенем пролесниково-снытевый
2	Окско-Донская равнина, Салтыковский прогиб, Гребневская структура (144 м)		5Д5Л ед. Б, Кл, Ос	Дубо-липняк снытевый
3	Окско-Донская равнина, Салтыковский прогиб, Лужковская впадина (131 м)	Широколиственные леса, светло-серые лесные среднесуглинистые почвы	5Д5Л ед. Б, Кл, Ос	Дубо-липняк волосистоосоковый
4	Пойма Оки, островная дубрава (98 м)	Интразональное сообщество, пойменно-лесные темно-серые тяжелосуглинистые почвы	6Л3Д1В + Кл	Пойменный дубо-липняк с вязом крапивно-снытевый
5а	Мещёрская низменность, влажная озерно-аллювиальная песчаная равнина с заболоченными западинами (110–114 м)	Подтайга, дерново-подзолистые песчаные почвы	5Е3Б1Д1С	Ельник с участием березы, дуба и сосны зелено-мошно-черничный
5б			4Л3Б2Д1Ос + Кл	Дубо-липняк с участием мелколиственных пород волосистоосоковый

Примечания: * в соответствии с генетической классификацией почв (Классификация ..., 1977); ** формула древостоя включает название породы (Д — дуб, Л — липа, Б — береза, Ос — осина, С — сосна, Е — ель, Кл — клен, В — вяз, Яс — ясень) и коэффициент, определяющий степень его участия (по запасу) в образовании древостоя; сумма всех коэффициентов формулы равняется десяти.

— среднегодовые расходы воды в Оке и максимальная высота половодий (гидропост Рязань);

— уровень грунтовых вод (УГВ) в Докучаевском колодце (Каменная Степь, Воронежская область, непрерывный ряд данных с 1892 г.) (Исаев и др., 2020; Чендев и др., 2020); экстраполяция данных на наш район исследований вполне допустима (Черенкова, 2009);

— динамика уровня Каспийского моря, как интегральное отражение увлажненности в бассейне Верхней Волги (Рычагов, 2011): использованы “восстановленные” данные (без потерь стока на заполнение водохранилищ, испарение с их поверхности и водопотребление) (Шиварева и др., 2013).

Пробоотбор, измерение ширины годовичных колец и построение хронологий. Источники дендрохронологической информации — спилов с упавших и керны с живых деревьев дуба (отбирались на высоте 1.3 м с помощью возрастного бурава *Halgof*). При этом предпочтение отдавалось спилам, так как использование кернов сопряжено с трудностью выявления выпадающих годовичных колец и может приводить к ошибкам в хронологиях, усложняющим их дальнейший анализ (Байбар, Харитонов, 2017; Румянцев, Черак-

шев, 2020). Объем исходных данных представлен в табл. 3 и сопоставим с количеством дендрохронологического материала в аналогичных исследованиях [см., например, (Matison et al., 2013)]. Каждая точка пробоотбора представляла собой одну фацию или группу идентичных фаций, единую по условиям микро- и нанорельефа и местного грунтового увлажнения (индексировалось по видовому составу нижних ярусов или непосредственными замерами глубины грунтовых вод). Пробоотбор (за исключением пойменной дубравы № 4) приурочивался к водоразделам или пологим приводораздельным склонам, характеризуя тем самым автоморфные позиции и зональные условия продуктивности сообществ. Формула древостоев вычислялась по результатам измерения полноты с помощью полнотомера Биттерлиха.

Подсчет ширины годовичных колец осуществлялся при помощи программ *CDendro* и *CooRecorder* с точностью до 0.01 мм, с последующей визуальной перекрестной датировкой. Возрастной тренд удалялся делением ширины кольца на значение аппроксимирующей функции для того же года. Для получения аппроксимирующей функции был выбран метод скользящего сглаживающего сплайна в 20-летнем

окне по Т.Т. Битвинскому (1974), поскольку, как установлено данным автором, именно 20-летние интервалы для условий Средней полосы бывшего СССР оптимальны для стандартизации рядов прироста и нивелировки возрастных трендов. Осреднение индивидуальных хронологий позволило получить обобщенную хронологию для каждой точки пробоотбора. Качество хронологий оценивалось с помощью выраженного сигнала популяции EPS (Briffa and Jones, 1990).

Статистическая обработка данных производилась в программных пакетах *Statistica* и *Excel* и включала расчет среднего прироста, стандартного отклонения прироста (SD), индекса местообитания SI [он же — индекс древесной продуктивности (site index, standardized tree productivity index) (Legout et al., 2020)]. SI определяется доминирующей высотой древостоя в данном возрасте и является функцией совокупности экологических, топографических и почвенных переменных (Fiandino et al., 2020):

$$SI = H_{\text{факт}} / H_{\text{зн}}, \quad (1)$$

где $H_{\text{факт}}$ — средняя высота древостоя в данном местообитании; $H_{\text{зн}}$ — зональная возрастная нормативная высота древостоя. В качестве $H_{\text{зн}}$ мы использовали значения высоты для дубовых древостоев смешанных лесов Восточно-Европейской равнины (Усольцев, 2002).

Коэффициенты синхронности, оценивающие число однонаправленных изменений между хронологиями от года к году, рассчитывались согласно (Тишин, Чижикова, 2018).

Достоверность различий климатических параметров и индикаторов увлажнения для циркуляционных эпох (по Г.Я. Вангенгейму) оценена по критерию Краскела-Уоллиса. Временная устойчивость связей в системе “климат—прирост” анализировалась с помощью корреляционного анализа с 30-летним скользящим окном (данный метод использовался для выявления долговременных биоклиматических взаимосвязей). Все статистические оценки значимы на уровне $p < 0.05$.

Для анализа биопродукционных последствий высокочастотных экстремальных колебаний климата применялся анализ реперных лет, основанный на ежегодных сравнениях аномалий прироста и соответствующих климатических условий (Storper, 1979). Расчет реперных лет осуществлялся на основе метода, изложенного в работах (Matison et al., 2013; Neuwirth et al., 2004). На первом этапе для каждой индивидуальной хронологии вычислялись относительные различия приростов Δi :

$$\Delta i = \frac{(x_i - \bar{x}_{i-5 \dots i-1})}{\bar{x}_{i-5 \dots i-1}} \times 100, \quad (2)$$

где x_i — индекс прироста для года i , $\bar{x}_{i-5 \dots i-1}$ — среднее значение индекса прироста за предыдущий 5-летний период. Затем Δi были преобразованы в баллы, от -5 до $+5$ (исключая 0), с 20-процентным шагом. Например, балл 5 соответствует $\Delta i > 80\%$, балл 4 соответствует $60 < \Delta i < 80$, балл 3 соответствует $40 < \Delta i < 60$ и т.д.

На следующем этапе для каждого года в каждой точке опробования рассчитывался индекс реперного года I :

$$I = \frac{\sum_{j=1}^k i_j}{k \times n} \times 100, \quad (3)$$

где в числителе — сумма баллов для всех изученных деревьев местообитания в данном году, n — количество деревьев, включенных в расчет, $k = 5$ [количество классов интенсивности реперных лет, см. (Neuwirth et al., 2004)]. Величина I характеризует силу проявления реперного года. Так, если $I = -100\%$ или 100% , это значит, что все изученные деревья в данной точке пробоотбора имеют экстремальное значение балла (-5 или $+5$) в данном году.

На финальном этапе осуществлялась градация положительных реперных лет в соответствии с величиной I : $I = 24-40\%$ — слабые реперные годы, $I = 41-60\%$ — средние реперные годы, $I > 60\%$ — сильные реперные годы. Аналогичная градация применялась для отрицательных реперных лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 2 отражены некоторые особенности климатической динамики в центре Русской равнины в конце XIX—XXI вв. Климатические данные за период инструментальных наблюдений были дифференцированы по циркуляционным эпохам Вангенгейма-Гирса (Гирс, 1971; Савичев и др., 2015); различия между климатическими параметрами эпох статистически обоснованы.

Как следует из табл. 2, существует ярко выраженное отличие первой половины XX в. от последующего времени по количеству годовых осадков. В 1891–1948 гг. количество осадков было достоверно меньше, чем с 1974 г. Эти различия в основном обусловлены осадками сентября—марта: с 1974 г. их количество больше, чем в конце XIX — первой половине XX в. Особенно заметен рост осенне-зимнего увлажнения в 1990–2014 гг. (эпоха зональной западной циркуляции). Кроме того, зимы последних двух эпох (1990–2020 гг.) заметно теплее, чем

Таблица 2. Медианные значения индикаторов ландшафтного увлажнения для циркуляционных эпох Вангенгейма-Гирса (по метеостанции Рязань)

Индикаторы увлажнения	Циркуляционная эпоха	1. W + C 1891–1899	2. W 1900–1928	3. E 1929–1939	4. C 1940–1948	5. E + C 1949–1973	6. E 1974–1989	7. W 1990–2014	8. E + C 2015–2020
осГОД		439.03 (6–8)	461.77 (6–8)	434.59 (6–8)	395.73 (5–8)	520.7 (4; 7)	545.00 (1–4)	596.40 (1–5)	580.90 (1–4)
осАПР–АВГ		212.28 (2; 5–7)	272.54 (1; 4)	257.56	226.57 (2; 6–8)	271.53 (1)	295.50 (1; 4)	270.80 (1; 4)	341.15 (4)
осСЕНТ–МАРТ		224.78 (3; 6–7)	201.34 (6–8)	186.69 (1; 5–8)	191.52 (6–8)	227.08 (3; 7)	277.55 (1–4; 7)	319.80 (1–6)	257.05 (2–4)
тДЕК–Ф		–9.93 (7–8)	–8.90 (7–8)	–8.46 (7–8)	–11.24 (7–8)	–9.66 (7–8)	–8.25 (8)	–6.30 (1–5; 8)	–4.77 (1–7)
тМАРТ		–4.75 (6–8)	–4.70 (7–8)	–3.28 (8)	–5.61 (6–8)	–4.89 (6–8)	–2.37 (1; 4–5; 8)	–2.36 (1–2; 4–5)	0.55 (1–6)
тАПР		2.70 (2; 5–8)	5.30 (1; 7)	5.22 (7–8)	3.78 (5–8)	5.87 (1; 4; 7)	5.56 (1; 4)	6.62 (1–5)	6.90 (1; 3–4)
тИЮНЬ–АВГ		18.23	18.03	18.22 (6)	18.07	17.81	17.17 (3)	17.97	17.98
УГВ		6.79 (6–7)	6.75 (6–8)	7.00 (6–7)	6.00 (6–8)	6.88 (6–8)	4.00 (1–5; 8)	4.05 (1–5; 8)	7.43 (2; 4–7)
УГВ-динамика		0.27	–0.10	–0.33 (6)	0.00	0.10	0.27 (3)	–0.19	–0.15
уКМ		–25.55 (2–8)	–25.87 (1; 3–8)	–26.21 (1–2; 4–6; 8)	–27.70 (1–3; 6–8)	–27.68 (1–3; 6–8)	–26.73 (1–5; 7)	–26.29 (1–2; 4–6; 8)	–26.93 (1–5; 7)
уКМ-динамика		0.01 (3; 8)	–0.01 (3; 6)	–0.15 (1–2; 5–7)	0.00	–0.01 (3; 8)	0.05 (2–3; 7–8)	0.01 (3; 6; 8)	–0.10 (1; 5–7)
Ока-макс		7.67 (5–8)	7.33 (5–8)	6.88 (7–8)	6.91 (6–8)	6.64 (1–2; 7–8)	6.46 (1–2; 4; 8)	5.90 (1–5; 8)	3.44 (1–7)
Ока-расход		577.35	575.15 (3; 5; 8)	471.58 (2; 6–7)	513.44 (7)	499.54 (2; 6–7)	581.48 (3; 5; 8)	611.58 (3–5; 8)	440.00 (2; 6–7)

Примечания: в скобках — номера эпох, с которыми у данной эпохи есть достоверные различия (на уровне $p < 0.05$; по результатам теста Краскала-Уоллеса); осГОД, осАПР–АВГ, осСЕНТ–МАРТ — количество осадков за гидрологический год, за апрель–август, за сентябрь предыдущего года – март текущего года, соответственно, мм; тДЕК–Ф, тМАРТ, тАПР, тИЮНЬ–АВГ — средняя температура за декабрь–февраль, за март, за апрель, за июнь–август, соответственно, °С; УГВ — уровень грунтовых вод (глубина залегания зеркала грунтовых вод от поверхности) в Докучаевском колодезе, м; УГВ-динамика — ежегодное изменение УГВ, м; уКМ — абсолютная отметка уровня Каспийского моря, м; уКМ-динамика — ежегодное изменение уровня Каспийского моря, м; Ока-макс — максимальная высота половодья на Оке, м от нуля гидропоста Рязань; Ока-расход — средний годовой расход воды в Оке, м³/сек.

Таблица 3. Статистические характеристики древесно-кольцевых хронологий *Q. robur*

№ на рис. 1	Объем исходных данных*	Длина хронологии	Возраст, лет	r	EPS	Средний радиальный прирост, мм/год $\pm$ SD	SI
1	9/24; [6]	1904–2023	120	0.784	0.876	1.79 ± 1.02	0.86
2	10/25; [10]	1923–2021	99	0.727	0.802	2.12 ± 1.23	1.08
3	8/18; [4]	1920–2022	103	0.817	0.831	1.45 ± 0.85	0.78
4	6/15; [3]	1885–2020	136	0.879	0.848	2.74 ± 1.26	1.18
5	6/13; [16]	1922–2021	100	0.849	0.810	1.77 ± 0.92	1.01

Примечания: * объектами дендрохронологического анализа являлись аналоги буровых кернов — индивидуальные радиальные направления торцевых спилов *Q. robur* [указано количество деревьев (в числителе) и направлений (в знаменателе)], использованных для дендрохронологического анализа; в квадратных скобках — количество деревьев для расчета SI; SD — стандартное отклонение прироста; r — средний коэффициент корреляции индивидуальных серий с обобщенной хронологией для каждой точки пробоотбора; EPS — выраженный сигнал популяции; SI — индекс древесной продуктивности.

Таблица 4. Коэффициенты синхронности древесно-кольцевых хронологий *Q. robur*, %

№ точек опробования	1	2	3	4	5
1		42.9	53.5	47.4	37.4
2	42.9		69.4	57.7	64.3
3	53.5	69.4		61.0	50.5
4	47.4	57.7	61.0		51.0
5	37.4	64.3	50.5	51.0	

Примечания: цветовая заливка соответствует следующим значениям коэффициентов синхронности: белая — синхронность отсутствует; светло-серая — низкие значения; серая — средние значения. Градация значений дана по шкале С.Г. Шиятова (Тишин, Чижикова, 2018).

в 1891–1973 гг., а температура марта с последней четверти XX в. выше, чем в предшествующий период. Летние температуры, как и осадки теплого периода, слабо различаются по эпохам.

В табл. 3 представлены статистические характеристики хронологий *Q. robur*. Как следует из табл. 3, радиальный прирост дуба в изученных местообитаниях различается в 1.9 раза, индекс древесной продуктивности SI — в 1.5 раза. При этом максимальная продуктивность (SI и средний прирост) характерна для пойменной дубравы (точка № 4), а минимальные приросты наблюдаются в точке № 3. Согласно полученным нами данным (табл. 4), хронологии из всех точек опробования в целом характеризуются слабой синхронностью. Наиболее “синхронизирующаяся” хронология получена для точки № 2.

Обратим внимание на некоторые неожиданные, на первый взгляд, результаты, представлен-

ные в табл. 3 и 4, которые требуют дальнейшего обсуждения:

— минимальная продуктивность дуба (SI и средний прирост) наблюдается не в подтайге (точка № 5), как можно было бы ожидать, исходя из представлений о зональных величинах биопроductивности (Базилевич и др., 1986), а в одном из сообществ широколиственных лесов (точка № 3 — Лужковская впадина Салтыковского прогиба);

— единственная хронология, не синхронизирующаяся ни с одним другим рядом данных, получена для точки № 1 (Среднерусская возвышенность, широколиственные леса). Кроме того, для дубовых древостоев в этой точке также характерны низкие приросты (ниже подтаежных);

— хронологии в точках № 2 и 3 имеют наибольшую синхронность, что вполне ожидаемо, так как они расположены в пределах единой структуры — Салтыковского прогиба, однако величины приростов и SI в этих точках принципиально различны (в точке № 3 — минимальные значения, в точке № 2 — максимальные среди изученных зональных сообществ).

Корреляционный анализ индексов прироста дубовых древостоев с климатическими данными за общий для всех хронологий период 1923–2020 гг. позволил выявить лишь три достоверно значимых невысоких корреляции. Это положительная связь прироста дуба в точке № 1 с осадками апреля–августа (0.23), в точке № 5 — с температурой мая (0.22), а также отрицательная связь прироста в точке № 4 с температурой декабря–февраля (–0.22).

На рис. 5 представлены результаты корреляционного анализа индексов прироста с климатическими факторами в 30-летнем скользящем окне, иллюстрирующие временную устойчивость

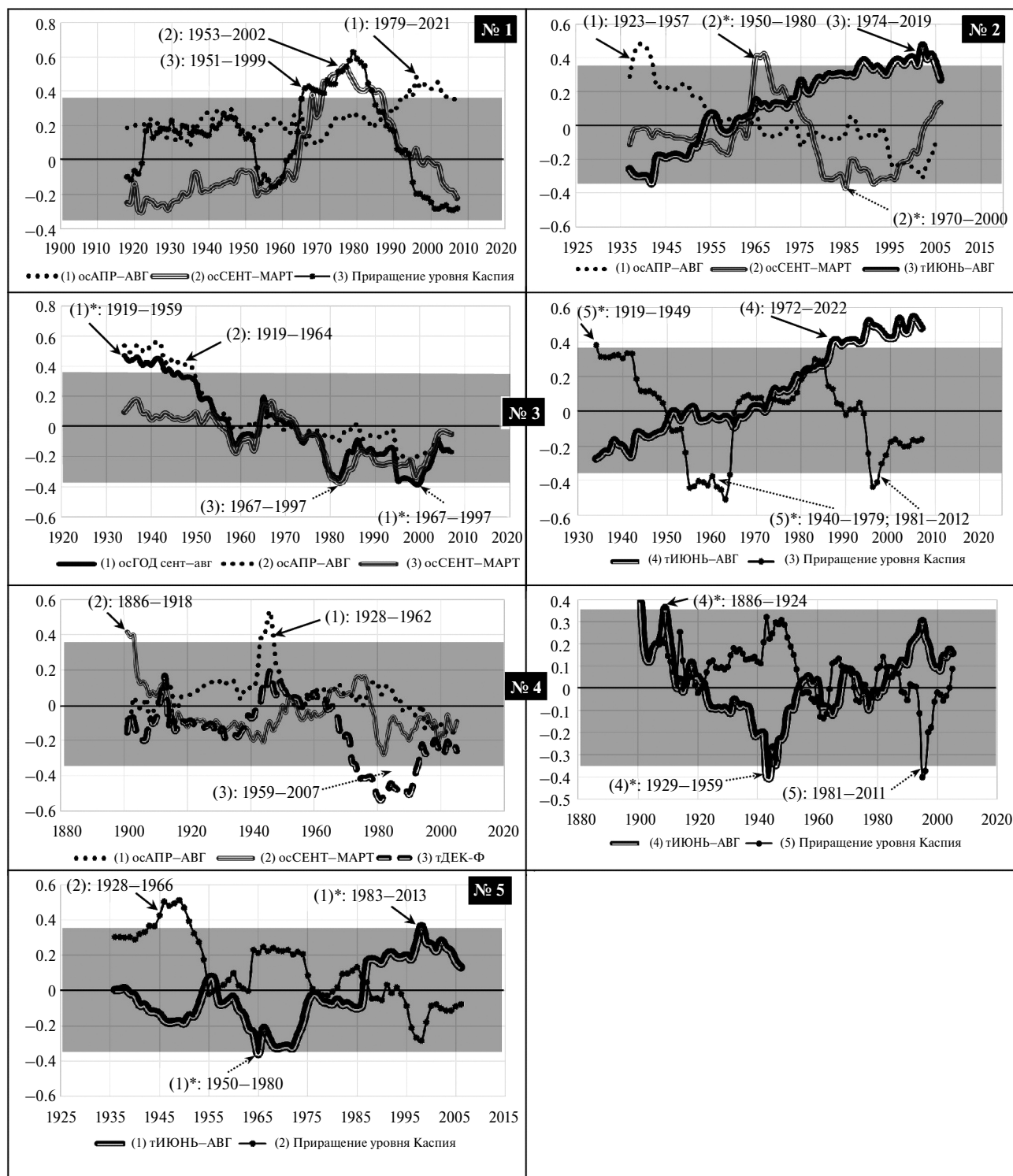


Рис. 5. Проявления нестационарности связей в системе “климат–прирост древостоев” (по результатам корреляционного анализа прироста древостоев в точках № 1, 2, 3, 4 и 5 с климатическими факторами и индикаторами увлажнения; показаны лишь наиболее значимые связи).

Примечания: по оси ординат — значения коэффициентов корреляции Спирмена; графики построены для центрального года 30-летнего скользящего окна корреляции. № 1–5 — номера изученных лесных экосистем (см. табл. 1 и рис. 1); 1–5 — номера гидротермических факторов биопродуктивности (см. примечание к табл. 2); серой областью показан интервал $-0.36 < r < 0.36$, в пределах которого коэффициенты корреляции признаны статистически незначимыми ($p \geq 0.05$); временные интервалы (например, 1953–2002) показывают периоды статистически достоверных взаимосвязей климатических факторов и прироста *Q. robur*; * — факторы, изменившие направленность корреляционной связи с приростом под влиянием динамики климата.

связей в системе “климат—прирост древостоев”. Как следует из данных, приведенных на рис. 5, связи прироста с климатом в целом нестационарны, то есть меняются с течением времени. Особенно ярко это проявляется на примере точек № 2, 3, 4 и 5.

В точке № 2 (Гребневский выступ Салтыковского прогиба) положительная связь с осадками сентября—марта в 1950—1970 гг. позднее сменилась на отрицательную. Кроме того, с середины 1970-х годов здесь проявляется положительная связь с летними температурами (как фактором интенсивности испарения в вегетационный период). Аналогичная связь с осадками теплого периода наблюдалась в 1920—1950 гг. Сходные закономерности характерны для точки № 3 (Лужковская впадина Салтыковского прогиба): положительная связь прироста с осадками теплого периода в 1920—1960-е годы позднее сменилась отрицательной корреляцией с параметрами увлажненности; с 1970-х годов также проявляется положительная связь с летними температурами.

В точке № 4 (пойменная дубрава) положительная связь прироста с летней температурой, проявлявшаяся до середины 1920-х годов, меняется на отрицательную в 1929—1959 гг. (на данный период приходится наиболее длительная аридная серия 1929—1946 гг., когда годовые осадки были более чем на 15% ниже средних значений за XX в.). В 1981—2011 гг. проявляется отрицательная корреляция прироста с динамикой Каспия.

Для хронологии дуба в точке № 5 (Мещёрская низменность) достоверных связей прироста с климатическими факторами крайне мало: это отрицательная корреляция с летними температурами в 1950—1980 гг., сменившаяся на положительную в 1983—2013 гг., а также положительная связь с динамикой уровня Каспия в 1930-е—1960-е годы. В точке № 1 (Среднерусская возвышенность), в отличие от остальных местообитаний, со второй половины XX в. про-

является положительная реакция прироста дубовых древостоев на большое число индикаторов увлажнения (годовые осадки, осадки теплого и осенне-зимнего периодов, годовые расходы Оки и максимальный уровень половодья, приращение уровня Каспия).

На рис. 6 показаны реперные годы для построенных хронологий. С одной стороны, есть “уникальные” реперные годы, специфичные только для одного-двух местообитаний (например, для точки № 1 это аридные 1946, 1975, 1988, 1992, 2002 гг.; для точки № 3 — избыточно влажный 1993 г.). С другой стороны, есть годы, когда прирост синхронно снижался в целом ряде точек опробования (например, 1954, 1964, вторая половина 1930-х годов, отличавшиеся, как правило, резким снижением увлажненности, иногда параллельно с экстремальной температурной динамикой).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ландшафтные закономерности взаимосвязей прироста и внутривековых колебаний климата. Установленный нами факт крайне малого числа значимых корреляций прироста дубовых древостоев с климатическими факторами за 1923—2020 гг. имеет два важных следствия:

- подтверждает установленное ранее (Matison et al., 2013) важное влияние на ширину годичных колец *Q. robur* ландшафтных факторов, снижающих чувствительность хронологий к региональным климатическим сигналам, и, следовательно, уменьшающих их пригодность для климатических реконструкций;
- указывает на то, что связи в системе “климат—прирост” могут иметь различный характер (и даже разный знак) в разные климатические эпохи, то есть быть нестационарными (Wilmking et al., 2020).

Анализ индикаторов ландшафтного увлажнения для циркуляционных эпох Вангенгейма-Гирса позволяет заключить, что ключевой момент

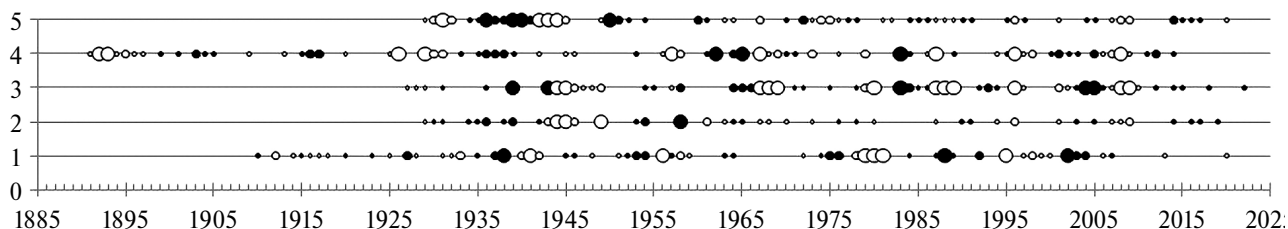


Рис. 6. Реперные годы для хронологий дуба черешчатого в центре Русской равнины.

Примечания: по вертикальной оси — номера точек опробования (см. табл. 1 и рис. 1); черные кружки — отрицательные реперные годы, белые — положительные реперные годы; кружки большого размера — сильные реперные годы, среднего размера — средние реперные годы, мелкого размера — слабые реперные годы (пояснения см. в разделе “Материалы и методы”).

климатической динамики в XX–XXI вв. — это принципиальное увеличение увлажненности ландшафтов центра Русской равнины с конца 1970-х годов. Оно проявилось в росте ресурсов подземных вод в средней полосе ЕТР на 15–30% (Джамалов и др., 2008; Многолетние ..., 2021), увеличении меженного стока и тенденции к росту длины постоянных водотоков первого порядка в центре и на юге Русской равнины (Golosov and Panin, 2006), расширении ареала гидроморфных почв и трансформации растительности (Исаев и др., 2020; Чендев и др., 2020) и интегрально отразилось в активном росте уровня Каспия (см. табл. 2). В первые годы XXI в. трансгрессивная осцилляция Каспия завершилась в связи с тенденциями к аридизации климата, и сложившиеся ранее биоклиматические взаимосвязи в 2010-х годах начали разрушаться (см. рис. 5), но в связи с незавершенностью процесса данный вопрос здесь не обсуждается. Наблюдавшегося до середины 2000-х годов увеличения увлажнения недостаточно для смещения границ природных зон (Черенкова, 2009), но “внутризональный” биопродукционный эффект весьма значителен и реализуется, в том числе, в изученных нами сообществах. При этом результаты настоящего исследования свидетельствуют, что нестационарность связей в системе “климат–прирост древостоев”, исходно обусловленная климатическими колебаниями (общими для всего района исследований), принципиально по-разному проявляется в разных ландшафтных условиях — в зависимости от локальных различий в литогенной основе ландшафтов.

Отрицательный характер связи различных индикаторов увлажнения и прироста дуба в точках № 2 и 3 показывает, что тенденция роста осадков с 1970-х годов была неблагоприятной для функционирования дубовых древостоев Салтыковского прогиба. Особенно ярко это проявилось в точке № 3. Для нее характерна не только минимальная продуктивность дуба (SI и средний прирост на 20% ниже соответствующих значений для подтаежных сообществ), но и обильный дубовый отпад, отсутствующий в других местообитаниях, при сравнительно близком залегании грунтовых вод (1.3–2.0 м в августе 2023 г.). Ландшафтная специфика точки № 3 (приуроченность к Лужковской впадине, см. рис. 2) создает предпосылки для переувлажнения корнеобитаемого слоя во влажные эпохи.

Известно, что масса и физиологическая активность тонких всасывающих корней деревьев зависят от погодных условий (Усольцев, 2018), в связи с чем архитектура корневых систем способна существенно меняться в ответ на климатические колебания: тонкие корни проникают в более глубокие слои почвы в периоды засух

и приобретают поверхностный характер при повышенном увлажнении (Brunner et al., 2015; Kuster et al., 2013; Persson et al., 1995). При этом особенно уязвимы фитоценозы в местообитаниях с близким залеганием грунтовых вод и их нестабильным уровнем. Негативное влияние на прирост в таких условиях будут оказывать как засухи (из-за пересыхания поверхностной толщи и гибели всасывающих корней), так и переувлажнение (из-за подтопления корневой системы, ее кислородного голодания и снижения продолжительности жизни) (McCormack and Guo, 2014; Oosterbaan and Nabuurs, 1991).

Мы полагаем, что именно такая ситуация характерна для точки № 3: если с 1970-х годов снижение прироста древостоев связано с переувлажнением, то в 1920–1950-е годы главным фактором депрессии прироста были засухи (на это указывает положительная связь с осадками теплого периода в эти годы, см. рис. 5). Таким образом, литогенная основа обеспечивает крайнюю узость зоны оптимума в отношении увлажнения для точки № 3, и именно к этой точке приурочены минимумы прироста дубовых древостоев. Частичным аналогом точки № 3 могут служить дубравы на низменностях Утрехта, Оверэйссела и иных регионов Голландии, где в 1980-е годы наблюдалась гидрогенная деградация корневых систем и общее угнетение древостоев (Oosterbaan and Nabuurs, 1991).

Сходная реакция дуба на климатическую динамику характерна для точки № 2. Однако высокая биопродуктивность (максимальные значения SI и радиального прироста среди изученных зональных сообществ) и хорошее состояние древостоя указывают на существенно меньшую экстремальность наблюдаемой климатической динамики для данного местообитания, что связано с приуроченностью точки № 2 к локальной положительной Гребневской структуре, осложняющей сниженный Салтыковский прогиб (см. рис. 2).

Известно, что типологическим признаком пойменных дубрав является поверхностная корневая система (не глубже 2 м), в связи с чем, критическими для них могут стать как засуха с падением УГВ, так и их резкий подъем (Иванов, 1991; Šenfeldr et al., 2021). Это сближает ландшафты окской поймы с природными комплексами Салтыковского прогиба. В этой связи закономерна синхронность, а также сходный характер связи приростов дуба с индикаторами ландшафтного увлажнения в пойменной точке № 4 с “зональными” точками № 2 и 3 (см. табл. 4, рис. 5), хотя величина биопродуктивности в интразональной дубраве вследствие трофности и проточности выше, чем в зональных сообществах (см. табл. 3).

Пойменные лесные экосистемы находятся в постоянном гидрологическом взаимодействии с реками, однако в отличие от ряда других работ (Экосистемы ..., 2004; Neklau et al., 2019; Mikas et al., 2018) наш анализ не зафиксировал корреляций прироста дуба в окской пойме с какими-либо параметрами речного стока. Косвенным индикатором связей функционирования древостоев в точке № 4 с пойменным режимом является отрицательная связь прироста с температурами зимы (для 1923–2020 гг.) и марта (для 1931–1966 гг., -0.38), которые, в свою очередь, отрицательно коррелируют с максимальной высотой половодья на Оке (значения соответствующих коэффициентов равны -0.39 и -0.53). Объем весеннего стока, таким образом, может быть важным фактором продуктивности пойменных сообществ, а в маловодные годы возможно развитие почвенной засухи, особенно при весенне-летнем дефиците осадков.

Для дуба в Южной Мещёре (точки № 5а и 5б) в целом прослеживается тот же характер связей с климатической динамикой, что и для точек № 2–4: отрицательная реакция на дефицит увлажнения 1950-х–1970-х годов, сменившаяся негативным влиянием роста увлажненности в середине 1970-х годов на функционирование древостоев (см. рис. 5). Специфической особенностью мещёрских ландшафтов является небольшое количество достоверных связей прироста с климатическими факторами. Это, по-видимому, обусловлено сниженным геоморфологическим положением и высоким гидроморфизмом, характерными не для локального участка (как в случае точки № 3), а для природной провинции в целом. Данные особенности выполняют “амортизирующую” функцию, затушевывая биотический отклик на климатическую динамику. Тенденция положительной связи прироста с температурой мая, статистически достоверная для 1923–2020 гг., является индикатором дефицита весеннего тепла и вероятности повреждения дуба майскими заморозками в подтаежных ландшафтах Мещёрской низменности, которая служит геоморфологически обусловленным каналом арктической адвекции, значимым для всей Русской равнины. Однако влияние майских заморозков на прирост в целом невелико: на фоне действия иных климатических факторов корреляция прироста с температурой мая в 30-летних скользящих окнах оказалась ниже уровня значимости (хотя в 1920–1970-е годы и приближалась к таковому) и поэтому не показана на рис. 5.

В отличие от дубовых древостоев в точках № 2–5, прирост дуба в точке № 1 (Среднерусская возвышенность) положительно реагировал на рост увлажнения в центре Русской равнины

с 1970-х годов. Ландшафтная специфика точки № 1 — приуроченность к унаследованной положительной локальной морфоструктуре — улучшает дренированность и создает предпосылки для обостренной реакции прироста древостоев на засухи разного масштаба. На важную положительную роль летнего увлажнения указывает также установленная нами корреляция прироста с осадками апреля–августа в 1923–2020 гг. Особенности литогенной основы точки № 1 также объясняют отсутствие синхронности приростов *Q. robur* с хронологиями других точек опробования (которые схожи между собой по ландшафтными предпосылками прироста, будучи приуроченными к более низким гипсометрическим ступеням) (см. табл. 4).

Анализ реперных лет. Остановимся на некоторых характерных примерах, иллюстрирующих влияние литогенных ландшафтных факторов на биопродукционные процессы на фоне однородного климатического сигнала.

1930-е годы, для второй половины которых характерна повышенная частота отрицательных реперных лет (см. рис. 6), — это эпоха восточной формы атмосферной циркуляции (Е). Эта эпоха отличается засушливостью, индикаторами которой являются падение УГВ и уровня Каспия (см. табл. 2). В 1939 г. УГВ в Докучаевском колодце достиг минимального уровня за весь XX в. (Чендев и др., 2020). Это отрицательный реперный год в точках № 2–5, а также в северной лесостепи Рязанской области (наши неопубликованные данные) и в Тульской области (Хасанов, Сакулина, 2017). Тот факт, что 1939 г. не отмечен в качестве отрицательного реперного года для точки № 1, дубовые древостои которой должны в первую очередь страдать от засухи, не противоречит здравому смыслу. Резкое снижение прироста дуба здесь произошло еще раньше, в 1937 и 1938 гг. (см. рис. 6), а методика расчета реперных лет такова, что учитывает величину изменения прироста для конкретного года относительно предыдущего 5-летнего периода.

Синхронное снижение приростов в точках № 1–5 в 1954 г. также вызвано сильной засухой (осадки апреля–августа на 1.25 стандартного отклонения ниже среднего, температура июня–августа на 1.88 стандартного отклонения выше среднего, УГВ в Докучаевском колодце упал на 1 м). При этом снижение прироста дуба в окской пойме в 1954 г. наблюдалось, но не достигло уровня реперного года, поэтому не отражено на рис. 6.

Еще один пример синхронного снижения приростов дуба в ландшафтах широколиственных лесов (точки № 1–4) — это 1964 г. (см. рис. 6). Отметим, что в 1964 г. прирост дуба

и сосны упал на обширных пространствах Восточной Европы: в центре Восточно-Европейской равнины (Соломина и др., 2016), в том числе в Тульской области (Хасанов, Сакулина, 2017) и в Южной Мещёре (Железнова, 2017); в местообитаниях разного типа (от свежих лесов до болот) северо-восточной Польши (Bijak, 2007); в заболоченных местообитаниях северо-западной Польши (Cedro and Sotek, 2016). Негативное влияние на прирост в 1964 г. мог оказать целый комплекс факторов: засушливый вегетационный период и теплая сухая осень 1963 г., сниженное летнее увлажнение, а также холодная затяжная весна, задержавшая сезонное развитие биоты. Для 1964 г. фенологами отмечены самые поздние за вторую половину XX в. сроки прилета некоторых видов птиц и зацветания ряда видов растений в Центральной России (Иванов, 2005). Аналогичные условия весеннего периода сложились также в 1965 г.

Затяжные холодные весны 1960-х годов — закономерное проявление процесса похолодания климата в это время. Отличительной особенностью 1960-х годов было исключительно высокое (максимальное за период 1873—1995 гг.) давление в центре Исландской депрессии и максимально низкое давление в центре Азорского максимума (Смирнов и др., 1998). Инверсионность полей давлений привела к глубокому минимуму зональной циркуляции над Северной Атлантикой, следствием чего стало увеличение площади арктического морского льда и зимнее похолодание в Европе (Hurrell and Van Loon, 1997). Индикатором нарушения зональной циркуляции могут быть значения индекса Северо-атлантического колебания (NAO): в 1960-е годы они минимальны (Железнова, 2017). При этом наименьшее значение для всей второй половины XX в. индекс NAO принимал в декабре-марте 1964 г., что объясняет зимне-весеннее похолодание, дефицит увлажнения и падение прироста древостоев на обширной территории.

Негативное влияние на прирост дуба весенних (майских) заморозков хорошо известно. Однако теплая весна и слишком ранние сроки весеннего развития биоты также могут иметь неблагоприятные последствия для функционирования сообществ. Например, самые ранние для второй половины XX в. сроки наступления целого ряда фенологических явлений наблюдались в 1975 г. (Иванов, 2005) из-за аномально теплых апреля и мая. Особенности погодных условий 1975 г. привели к развитию весенне-раннелетней засухи, охватившей обширные районы ЕТР, Западной Сибири и Северного Казахстана (Садоков и др., 2008). Засуха пагубно повлияла на вегетацию не только культурных растений, но и естественных фитоценозов. 1975 г. — это

отрицательный реперный год в двух местообитаниях — в точках № 1 и 3, которые, несмотря на принципиальные ландшафтные различия, наиболее уязвимы для засух.

Очевидно, что именно засухи — основная причина снижения приростов дубовых древостоев в точке № 1 (Среднерусская возвышенность) в 1920, 1937 (следствие засухи 1936 г.), 1938, 1946, 1988, 2002 гг. В других точках опробования в засушливые годы прирост может не только падать, но и расти (например, в 1988 и 1996 гг.). При этом сильнейшая засуха 2010 г. не нашла отражения ни в одной из изученных нами хронологий (см. рис. 6). Одна из причин этого — позднелетний характер засухи 2010 г.: ко времени засухи годовичное кольцо в существенной мере уже было сформировано и накоплены ассимилянты для последующего роста. Аналогичные результаты были получены для сосны и дуба в центре ЕТР (Мацковский и др., 2017), однако в указанной работе заметное угнетение прироста произошло в 2011 г. Отсутствие снижения приростов изученных нами дубовых древостоев в 2010—2011 гг. может быть связано с известным фактом высокой инерционности прироста дуба (Matison et al., 2013). 2007—2009 гг., как показано на рис. 6, — это положительные реперные годы в точках № 2—5. Благоприятные условия и положительная динамика прироста в 2007—2009 гг. (а также ландшафтная специфика ряда местообитаний) смягчили последствия экстремального лета 2010 г. для функционирования сообществ.

Примерами дифференцирующего влияния ландшафтных факторов на поле биопродуктивности древостоев могут быть также 1958 и 1993 гг., которые, в отличие от рассмотренных выше засушливых лет, характеризовались повышенным увлажнением. 1958 г. — это отрицательный реперный год для дубовых древостоев Салтыковского прогиба (точки № 2 и 3). При этом приросты дуба в местообитаниях, приуроченных к Среднерусской возвышенности (точка № 1) и окской пойме (точка № 4), наоборот, были повышены (см. рис. 6). Особенности 1958 г. — поздняя весна, повышенное увлажнение мая и августа, прохладное лето. Кроме того, для 1958 г. аномальны ландшафтные индикаторы увлажнения: рост уровня Каспия и УГВ. УГВ в Докучаевском колодце в 1958 г. вырос на 1.73 м (это почти максимальное значение за весь период наблюдения). Снижение приростов дуба там, где ландшафтные условия в той или иной мере препятствуют оттоку почвенно-грунтовых вод (точки № 2 и 3), могло быть следствием переувлажнения. Влажные 1957—1958 гг. следовали после засухи 1954 и 1956 гг. Адаптацией древостоев к засухе является более глубокое проникновение

их корневых систем (Tumajer and Trembl, 2017). Резкое изменение уровня увлажненности в 1958 г. могло привести к подтоплению, отмиранию части корней и снижению прироста стволовой древесины. Дополнительным фактором такого снижения могла быть вспышка численности непарного шелкопряда (*Lymantria dispar* L.) в лесхозах Рязанской области, пик которой пришелся на 1957–1958 гг. (Марков, 2004). Впрочем, возникновение вспышки *L. dispar* именно в это время также может быть следствием погодных особенностей середины 1950-х годов (водный стресс во время синхронного массового роста побегов и сосущих корней), обусловивших дефицит тонких корней. Как показывают результаты более чем 30-летних исследований вспышек численности вредителей леса (Максимов, Марущак, 2011; Максимов и др., 2022), именно специфика погодных условий и недостаток сосущих корней у растения-хозяина являются ключевыми предпосылками массовых размножений грызущих филофагов.

Прирост 1993 г. формировался в условиях аномального количества осадков июня, июля и особенно осени — зимы 1992–1993 гг. Подчеркнем, что именно в 1993 г. УГВ в Докучаевском колодце поднялся до максимальной отметки за весь период наблюдений (в значительной мере как результат влажных теплых зим (см. табл. 2)). Повышенное увлажнение вызвало подтопление корнеобитаемой толщи, анаэробизм, отмирание корней и закономерное снижение прироста стволовой древесины дубовых древостоев, приуроченных к Салтыковскому прогибу и окской пойме (точки № 2–4). Однако лишь в точке № 3, характеризующейся максимальным гидроморфизмом среди всех точек опробования, эффект переувлажнения был настолько значимым, что прирост древесины упал до уровня реперного года (см. рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют подтвердить принятое в качестве гипотезы положение о влиянии структурных неоднородностей литогенной основы ландшафтов на поле биопродуктивности древостоев. Даже сравнительно недалеко расположенные территории в зависимости от своих ландшафтных особенностей могут иметь специфику связей в системе “прирост древостоев—климат”. Поэтому получить достоверную “среднюю” оценку функциональной реакции растительных сообществ на климатическую динамику для больших территорий может быть проблематично. Учет особенностей ландшафтной структуры территории, в том числе

геологического строения и рельефа, позволяет объяснять и прогнозировать закономерности биопродукционного потенциала лесных сообществ.

Климатические изменения последней четверти XX в. — рост увлажненности ландшафтов центра Русской равнины — имели неоднозначный эффект на прирост дубовых древостоев поймы Оки и соседних ландшафтов широколиственных лесов и подтайги. В местообитаниях, где сочетание литогенных ландшафтных факторов способствует оттоку почвенно-грунтовых вод, реакция прироста дуба на возросшее увлажнение была положительной. В условиях поймы наблюдались отдельные эпизоды переувлажнения, снизившего прирост. В местообитаниях с геологически и геоморфологически обусловленным затрудненным водообменом (Мещёрская низменность и особенно Лужковская впадина Салтыковского прогиба) возросшее увлажнение стало ключевым фактором, снизившим прирост древостоев. При этом особенно ярко проявилось нарушение стационарности связей в системе “климат—прирост древостоев”: до середины XX в. дуб в этих местообитаниях, наоборот, положительно реагировал на влагу. В 1930–1950-е годы основным лимитирующим фактором для функционирования дубовых древостоев, по-видимому, был дефицит увлажнения.

Результаты настоящего исследования показывают, что неучет ландшафтных факторов прироста препятствует объяснению пространственной дифференциации биопродукционных процессов, зачастую выглядящих случайными, хаотичными (что препятствует, в частности, синхронизации хронологий дуба, построенных по исторической древесине). Даже на примере ограниченного количества точек опробования, рассмотренных нами выше, хорошо иллюстрируются масштабы внутризональных различий прироста, которые в условиях существенных неоднородностей литогенной основы могуткратно превышать зональные. Охарактеризованные в данной работе факторы прироста, по нашему мнению, актуальны не только для ландшафтов центра Русской равнины, но и иных равнинных регионов, поскольку базируются на универсальных геофизических факторах ландшафтных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анненская Г.Н., Мамай И.И., Цесельчук Ю.Н. Ландшафты Рязанской Мещеры и возможности их освоения. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 246 с.
- Асеев А.А., Веденская И.Э. Развитие рельефа Мещерской низменности. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 128 с.

- Базилевич Н.И., Гребенщиков О.С., Тишков А.А. Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 297 с.
- Байбар А.С., Харитонова Т.И. Методические подходы к оценке продуктивности лесных экосистем (на примере ландшафтов Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника) // Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: матер. XII Международ. ландшафт. конф.: в 3-х т. Тюмень: Тюменский гос. ун-т, 2017. С. 64–67.
- Битвинскас Т.Т. Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 172 с.
- Боков В.А., Смирнов В.О. О смыслах способов оценки увлажнения ландшафтов // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2019. № 1. С. 83–92.
- Гирс А.А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные метеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 280 с.
- Гласко М.П. Соотношение блоковых морфоструктур и современных движений равнинно-платформенной территории (на примере центральной части Русской равнины). Дисс. ... канд. геогр. наук. М., 1984. 253 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. 2-е изд. Серия Московская. Л. N-37-XVI (Рязань); N-37-XVII (Спасск-Рязанский). Объяснительная записка / А.А. Николаев, В.В. Шарапов и др. Электрон. текстовые дан. М.: Московский филиал ФГБУ “ВСЕГЕИ”, 2021.
- Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Кричевец Г.Н., Сафронова Т.И., Сотникова Л.Ф., Громова Ю.В. Изменение подземного стока под влиянием климата и антропогенных воздействий // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 17–24.
- Железнова О.С. Комплексная оценка биогеохимической устойчивости экосистем в условиях техногенеза (на примере подтаежных лесов Южной Мещеры). Дисс. ... канд. биол. наук. М.: Рос. ун-т дружбы народов, 2017. 297 с.
- Железнова О.С., Тобратов С.А. Опыт ландшафтно-го анализа пространственных закономерностей продуктивности зональных экосистем Южной Мещеры // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 6. С. 47–62.
<https://doi.org/10.7868/S0373244417060056>
- Иванов А.П. От весны до весны. Записки фенолога: по результатам наблюдений за сезонным развитием природы за 50 лет XX века (1950–2000 гг.). 2005. 136 с.
- Иванов В.В. Сравнительный анализ водного режима пойменной и нагорной дубрав Теллермановского массива. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.: Лаборатория лесоведения АН СССР, 1991. 22 с.
- Исаев В.А., Белобров В.П., Иванов А.Л. Динамика факторов почвообразования и их влияние на технологию земледелия в Каменной степи // Бюлл. Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. № 104. С. 5–30.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-5-30>
- Классификация и диагностика почв СССР / сост. В.В. Егоров, В.М. Фридланд, Е.Н. Иванова и др. М.: Колос, 1977. 225 с.
- Коломыц Э.Г. Локальные коэффициенты увлажнения и их значение для экологических прогнозов // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 5. С. 61–72.
- Коломыц Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды. М.: Наука, 2003. 371 с.
- Кривцов В.А., Тобратов С.А., Водорезов А.В., Комаров М.М., Железнова О.С., Соловьева Е.А. Природный потенциал ландшафтов Рязанской области / под ред. В.А. Кривцова, С.А. Тобратова. Рязань: Ряз. гос. ун-т им. С.А. Есенина, 2011. 768 с.
- Максимов С.А., Марущак В.Н., Андреев Г.В. О биологической природе вспышек массового размножения грызунов филлофагов (на примере непарного шелкопряда *Lymantria dispar* (L.) (Lepidoptera, Lymantriidae)) // Бюлл. Моск. общ-ва испытателей природы. Отдел биологический. 2022. Т. 127. № 5. С. 21–33.
- Максимов С.А., Марущак В.Н. К теории динамики популяций непарного шелкопряда на Урале // Аграрный вестн. Урала. 2011. № 9 (88). С. 13–16.
- Марков В.А. Экология и динамика численности лесных насекомых Центральной России. Дисс. ... д-ра биол. наук. Рязань: Рязанский гос. пед. ун-т им. С.А. Есенина, 2004. 351 с.
- Масляев В.Н. Литогенная основа ландшафта как объект геоэкологических исследований // Вестн. Мордовского ун-та. 2008. № 1. С. 119–123.
- Мацковский В.В., Ломакин Н.А., Матвеев С.М. Реперные годы в рядах ширины годовых колец сосны в Воронежской области // Засухи Восточно-Европейской равнины по гидрометеорологическим и дендрохронологическим данным / отв. ред. О.Н. Соломина. М.—СПб.: Нестор-История, 2017. С. 203–207.
- Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях: научно-прикладной справочник / ред. М.Л. Марков. СПб.: ООО “РИАЛ”, 2021. 202 с.
- Органова Н.М., Войлошников В.Д. Современные представления о геологическом строении Рязанской области // Рязанский край: история, природа, хозяйство. Рязань: Изд-во Рязанского гос. пед. ин-та им. С.А. Есенина, 1991. С. 178–193.
- Романовский М.Г., Мамаев В.В. Грунтовые воды нагорных дубрав Теллермановского леса // Лесоведение. 2002. № 5. С. 6–11.
- Румянцев Д.Е., Черакшеев А.В. Методические подходы для определения возраста деревьев // Принципы экологии. 2020. Т. 9. № 4. С. 104–117.
<https://doi.org/10.15393/j1.art.2020.10142>

- Рысин Л.П., Рысина Г.П.* Дуб обыкновенный // Биологическая флора Московской области / ред. В.Н. Павлов, Т.А. Работнов, В.Н. Тихомиров. М.: Изд-во МГУ, 1990. С. 102–130.
- Рычагов Г.И.* Колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия, прогноз // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2011. № 2. С. 4–12.
- Савичев А.И., Мироничева Н.П., Цепелев В.Ю.* Особенности колебаний атмосферной циркуляции в Атлантико-Евразийском секторе полушария за последние десятилетия // Уч. записки Рос. гос. гидрометеорологического ун-та. 2015. № 39. С. 120–131.
- Садоков В.П., Козельцева В.Ф., Кузнецова Н.Н.* Анализ летних засух 1972, 1975, 1984 и 2002 гг. // Тр. гидрометеорологического научно-исслед. центра Российской Федерации. 2008. № 342. С. 23–36.
- Смирнов Н.П., Воробьев В.Н., Качанов С.Ю.* Северо-Атлантическое колебание и климат. СПб.: Изд-во РГГМУ, 1998. 122 с.
- Смирнов С.И.* Оценка разнообразия и состояния региональных и локальных популяций видов деревьев — основных эдификаторов и доминантов современного лесного пояса // Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. В 2 кн. Кн. 1 / отв. ред. О.В. Смирнова. М.: Наука, 2004. С. 324–337.
- Солнцев В.Н.* О гравитационной парадигме ландшафтоведения / Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А. Солнцева в современном ландшафтоведении). М.—Смоленск: Ойкумена, 2013. С. 155–169.
- Солнцев Н.А.* Учение о ландшафте: Избр. тр. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 383 с.
- Соломина О.Н., Кузнецова В.В., Мацковский В.В., Долгова Е.А.* От чего зависит ширина годовичных колец деревьев в центральной части Восточно-Европейской равнины? // Изв. РАН. Сер. геогр. 2016. № 3. С. 47–64.
<https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-3-47-64>
- Спиридонов А.И.* Геоморфология Европейской части СССР. М.: Высшая школа, 1978. 335 с.
- Тишин Д.В., Чижикова Н.А.* Дендрохронология: уч.-методич. пособие. Казань: Казанский ун-т, 2018. 34 с.
- Усольцев В.А.* В подвалах биосферы: что мы знаем о первичной продукции корней деревьев? // Экопотенциал. 2018. № 4 (24). С. 25–79.
- Усольцев В.А.* Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 762 с.
- Философов В.П.* Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1960. 96 с.
- Хасанов Б.Ф., Сакулина Г.А.* Факторы, определяющие синхронное понижение прироста дуба черешчатого (на примере Тульской области) / Засухи Восточно-Европейской равнины по гидрометеорологическим и дендрохронологическим данным / отв. ред. О.Н. Соломина. М.—СПб.: Нестор-История, 2017. С. 183–193.
- Чендев Ю.Г., Тишков А.А., Савин И.Ю., Лебедева М.Г., Соловьев А.Б.* Реакция почв и других компонентов природной среды на климатические изменения разной периодичности на юге Среднерусской возвышенности // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 3. С. 427–440.
<https://doi.org/10.31857/S258755662003005X>
- Черенкова Е.А.* Изменение увлажнения суббореальных равнинных ландшафтов России в XX и XXI веках. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: Институт географии РАН, 2009. 20 с.
- Шиварева С.П., Ли В.И., Голубцов В.В.* Моделирование уровня Каспийского моря с учетом водопотребления и в условиях изменяющегося климата // Гидрометеорология и экология. 2013. № 1. С. 83–101.
- Экосистемы Теллермановского леса* / отв. ред. В.В. Осипов. М.: Наука, 2004. 340 с.
- Bijak S.* Tree growth — climate response in relation to habitat type in spruce stands of the Borecka Primeval Forest // TRACE — Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology (Proc. of the Dendrosymposium 2006, April 20th–22nd 2006, Tervuren, Belgium). 2007. Vol. 5. P. 54–59.
- Briffa K.R., Jones P.D.* Measuring the statistical quality of a chronology / Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences / Cook E.R., Kairiukstis L.A. (Eds.). Boston, Mass., USA: Kluwer Academic Publ., 1990. P. 137–152.
- Brunner I., Herzog C., Dawes M.A., Arend M., Sperisen C.* How tree roots respond to drought // Front. Plant Sci. 2015. Vol. 6. Art. 547.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00547>
- Cedro A., Sotek Z.* Natural and anthropogenic transformations of a Baltic raised bog (Bagno Kusowo, North West Poland) in the light of dendrochronological analysis of *Pinus sylvestris* L. // Forests. 2016. Vol. 7. № 9. Art. 202.
<https://doi.org/10.3390/f7090202>
- Cropper J.P.* Tree-ring skeleton plotting by computer // Tree-Ring Bul. 1979. Vol. 39. P. 47–59.
- Diers M., Weigel R., Leuschner C.* Both climate sensitivity and growth trend of European beech decrease in the North German Lowlands, while Scots pine still thrives, despite growing sensitivity // Trees. 2023. Vol. 37. P. 523–543.
<https://doi.org/10.1007/s00468-022-02369-y>
- Fiandino S., Plevich J., Tarico J., Utello M., Demaestri M., Gyenge J.* Modeling forest site productivity using climate data and topographic imagery in *Pinus elliottii* plantations of central Argentina // Annals of Forest Sci. 2020. Vol. 77. Art. 95.
<https://doi.org/10.1007/s13595-020-01006-3>

- Goloso V., Panin A. Century-scale stream network dynamics in the Russian Plain in response to climate and land use change // *Catena*. 2006. Vol. 66. P. 74–92.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.07.011>
- Heklau H., Jetschke G., Bruelheide H., Seidler G., Haider S. Species-specific responses of wood growth to flooding and climate in floodplain forests in Central Germany // *iForest — Biogeosciences and Forestry*. 2019. Vol. 12. № 3. P. 226–236.
<https://doi.org/10.3832/for2845-012>
- Hurrell J.W., Van Loon H. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation // *Climatic Change*. 1997. Vol. 36. P. 301–326.
<https://doi.org/10.1023/A:1005314315270>
- Kasper J., Leuschner C., Walentowski H., Petritan A.M., Weigel R. Winners and losers of climate warming: Declining growth in *Fagus* and *Tilia* vs. stable growth in three *Quercus* species in the natural beech-oak forest ecotone (western Romania) // *Forest Ecology and Management*. 2022. Vol. 506. Art. 119892.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119892>
- Kuster T.M., Arend M., Günthardt-Goerg M., Schulin R. Root growth of different oak provenances in two soils under drought stress and air warming conditions // *Plant and Soil*. 2013. Vol. 369. P. 61–71.
<https://doi.org/10.1007/s11104-012-1541-8>
- Legout A., Hansson K., Van der Heijden G., Laclau J.-P., Mareschal L., Nys C., Nicolas M., Saint-André L., Ranger J. Chemical fertility of forest ecosystems. Part 2: Towards redefining the concept by untangling the role of the different components of biogeochemical cycling // *Forest Ecology and Management*. 2020. Vol. 461. Art. 117844.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117844>
- Matison R., Elferts D., Brūmelis G. Pointer years in tree-ring width and earlywood-vessel area time series of *Quercus robur* — relation with climate factors near its northern distribution limit // *Dendrochronologia*. 2013. Vol. 31. P. 129–139.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.10.001>
- McCormack M.L., Guo D. Impacts of environmental factors on fine root lifespan // *Front. Plant Sci*. 2014. Vol. 5. Art. 205.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00205>
- Mikac S., Žmegač A., Trlin D., Paulić V., Oršanić M., Anić I. Drought-induced shift in tree response to climate in floodplain forests of Southeastern Europe // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 7, 8. № 1. Art. 16495.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-34875-w>
- Neuwirth B., Esper J., Schweingruber F.H., Winiger M. Site ecological differences to the climatic forcing of spruce pointer years from the Lötschental, Switzerland // *Dendrochronologia*. 2004. Vol. 21. P. 69–78.
<https://doi.org/10.1078/1125-7865-00040>
- Niinemets Ü., Valladares F. Tolerance to shade, drought and waterlogging in the temperate dendroflora of the Northern hemisphere: tradeoffs, phylogenetic signal and implications for niche differentiation // *Ecological Monographs*. 2006. Vol. 76. № 4. P. 521–547.
<https://doi.org/10.1016/b978-008045405-4.00826-0>
- Oosterbaan A., Nabuurs G.J. Relationships between oak decline and groundwater class in The Netherlands // *Plant and Soil*. 1991. Vol. 136. № 1. P. 87–93.
<https://doi.org/10.1007/bf02465223>
- Persson H., Fircks Y.V., Majdi H., Nilsson L.O. Root distribution in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand subjected to drought and ammonium-sulphate application // *Plant and Soil*. 1995. Vol. 168–169 (1). P. 161–165.
<https://doi.org/10.1007/BF00029324>
- Scharnweber T., Smiljanic M., Cruz-García R., Manthey M., Wilmking M. Tree growth at the end of the 21st century — the extreme years 2018/19 as template for future growth conditions // *Environ. Res. Lett.* 2020. Vol. 15. № 7. Art. 074022.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab865d>
- Šenfeldr M., Horák P., Kvasnica J., Šrámek M., Hornová H., Maděra P. Species-specific effects of groundwater level alteration on climate sensitivity of floodplain trees // *Forests*. 2021. Vol. 12. № 9. Art. 1178.
<https://doi.org/10.3390/f1209117>
- Tumajer J., Tremel V. Influence of artificial alteration of groundwater level on vessel lumen area and tree-ring width of *Quercus robur* // *Trees*. 2017. Vol. 31. № 6. P. 1945–1957.
<https://doi.org/10.1007/s00468-017-1598-3>
- Van Mantgem P.J., Stephenson N.L., Byrne J.C., Daniels L.D., Franklin J.F., Ful'e P.Z., Harmon M.E., Larson A.J., Smith J.M., Taylor A.H., Veblen T.T. Widespread increase of tree mortality rates in the Western United States // *Science*. 2009. Vol. 323. № 5913. P. 521–524.
<https://doi.org/10.1126/science.1165000>
- Vospernik S., Heym M., Pretzsch H. et al. Tree species growth response to climate in mixtures of *Quercus robur*/*Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* across Europe — a dynamic, sensitive equilibrium // *Forest Ecology and Management*. 2023. Vol. 530. Art. 120753.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120753>
- Wilmking M., van der Maaten-Theunissen M., van der Maaten E., Scharnweber T., Buras A., Biermann C., Gurskaya M., Hallinger M., Lange J., Shetti R., Smiljanic M., Trouillier M. Global assessment of relationships between climate and tree growth // *Global Change Biology*. 2020. Vol. 26. № 6. P. 3212–3220.
<https://doi.org/10.1111/gcb.15057>

Lithogenic Base of Landscapes as a Growth Factor of Pedunculate Oak Growth (*Quercus robur* L.) in a Changing Climate (on the Example of the Center of the Russian Plain)

O. S. Zheleznova^{a,*} and S. A. Tobratov^a

^aRyazan State University named for S. Yesenin, Ryazan, Russia

*e-mail: zheleznova_rzn@mail.ru

This paper analyses the radial growth patterns of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in zonal and intrazonal broadleaf forests and subtaiga landscapes in the centre of the Russian Plain. Tree-ring chronologies were constructed for five habitats located in contrasting geological and geomorphological conditions. The average radial growth of oak trees within the study area varies by 1.9 times (1.45–2.74 mm/year), with the greatest increases typical of floodplain oak forests. A sliding-window correlation analysis revealed that the chronologies under consideration are characterized by a violation of the stationary relationships within the ‘climate–growth of stands’ system. It was revealed that a fundamental increase in the moisture content of regional landscapes since the 1970s (primarily due to increased precipitation from September to March) has had ambiguous consequences for oak stand functioning. In the Central Russian Upland, where a combination of landscape factors results in greater drainage, oak growth responded positively to increased moisture. Drought is usually the main growth-limiting factor. In less drained habitats, such as the Saltykovsky trough and the Meshchera lowland, increased moisture negatively impacted oak growth. The lowest bioproductivity (1.5 times lower than zonal values) was recorded in oak stands in the Luzhkov Depression (Saltykovsky Trough, light grey forest soils), rather than on the low-trophic sandy substrates of the Meschera: factors of relief and geological structure were found to be more important than the substrate factor. The factors responsible for the sharpest decrease in growth are characterised using the pointer years method. The results show that, since the 1970s, excess moisture has limited oak growth in most of the landscapes studied, but the climate signal has been significantly transformed by the lithogenic base of these landscapes and cannot be adequately interpreted without taking this into account.

Keywords: dendrochronology, pedunculate oak, landscape structure, non-stationary relationships in the ‘climate–growth of stands’ system, pointer years, factors of the stand growth

REFERENCES

- Annenskaya G.N., Mamay I.I., Tseselchuk Yu.N. *Landshafty Ryazanskoi Meshchery i vozmozhnosti ikh osvoeniya* [The Landscapes of the Ryazan Meshchera and the Opportunities of Their Development]. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 1983. 246 p.
- Aseev A.A., Vedenskaya I.E. *Razvitie rel'efa Meshcherskoi nizmennosti* [Development of the Relief of the Meshchera Lowland]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1962. 128 p.
- Baibar A.S., Kharitonova T.I. Methodical approach to the assessment of forest productivity (on example of Central Forest nature reserve). In *Landshaftovedenie: teoriya, metody, landshaftno-ekologicheskoe obespechenie prirodopol'zovaniya i ustoichivogo razvitiya. Materialy XII Mezhdunarodnoi landshaftnoi konferentsii* [Landscape Science: Theory, Methods, Landscape and Environmental Management and Sustainable Development. Proc. of the 12th Int. Landscape Conf.]. Tyumen: Izd-vo TyumGU, 2017, pp. 64–67. (In Russ.).
- Bazilevich N.I., Grebenshikov O.S., Tishkov A.A. *Geograficheskie zakonomernosti struktury i funktsionirovaniya ekosistem* [Geographic Patterns of the Ecosystems Structure and Functioning]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 297 p.
- Bijak S. Tree growth — climate response in relation to habitat type in spruce stands of the Borecka Primeval Forest. In *TRACE — Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology. Proc. of the Dendrosymposium. No. 5*. Tervuren, 2007, pp. 54–59.
- Bitvinskas T.T. *Dendroklimaticheskie issledovaniya* [Dendroclimatic Studies]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1974. 172 p.
- Bokov V.A., Smirnov V.O. On the scope of methods for the assessment of landscapes humidification assessment. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2019, no. 1, pp. 83–92. (In Russ.).
- Briffa K.R., Jones P.D. Measuring the statistical quality of a chronology. In *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Cook E.R., Kairiukstis L.A., Eds. Boston, Mass., USA: Kluwer Academic Publ., 1990, pp. 137–152.
- Brunner I., Herzog C., Dawes M.A., Arend M., Sperisen C. How tree roots respond to drought. *Front. Plant Sci.*, 2015, vol. 6, art. 547.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00547>

- Cedro A., Sotek Z. Natural and anthropogenic transformations of a Baltic raised bog (Bagno Kusowo, North West Poland) in the light of dendrochronological analysis of *Pinus sylvestris* L. *Forests*, 2016, vol. 7, no. 9, art. 202. <https://doi.org/10.3390/f7090202>
- Chendev Yu.G., Tishkov A.A., Savin I.Yu., Lebedeva M.G., Solovyov A.B. The reaction of soils and natural environment to climate changes of different periodicity in the south of Central Russian upland. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, no. 3, pp. 427–440. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S258755662003005X>
- Cherenkova E.A. Changes in the humidification of subboreal lowland landscapes of Russia in the twentieth and twenty-first centuries. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Inst. Geogr., Russ. Acad. Sci., 2009. 20 p.
- Cropper J.P. Tree-ring skeleton plotting by computer. *Tree-Ring Bull.*, 1979, vol. 39, pp. 47–59.
- Diers M., Weigel R., Leuschner C. Both climate sensitivity and growth trend of european beech decrease in the North German Lowlands, while scots pine still thrives, despite growing sensitivity. *Trees*, 2023, vol. 37, pp. 523–543. <https://doi.org/10.1007/s00468-022-02369-y>
- Dzhamalov R.G., Zektser I.S., Krichevets G.N., Safronova T.I., Sotnikova L.F., Gromova Yu.V. Changes in groundwater runoff under the effect of climate and anthropogenic impact. *Water Resour.*, 2008, vol. 35, no. 1, pp. 17–24.
- Ekosistemy Tellermanovskogo lesa* [Ecosystems of the Tellerman Forest]. Osipov V.V., Ed. Moscow: Nauka Publ., 2004. 340 p.
- Fiandino S., Plevich J., Tarico J., Utello M., Demaestri M., Gyenge J. Modeling forest site productivity using climate data and topographic imagery in *Pinus elliottii* plantations of central Argentina. *Ann. For. Sci.*, 2020, vol. 77, art. 95. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-01006-3>
- Filosofov V.P. *Kratkoe rukovodstvo po morfometricheskomu metodu poiskov tektonicheskikh struktur* [A Brief Guide to the Morphometric Method of Searching for Tectonic Structures]. Saratov: Izd-vo Saratov. Univ., 1960. 96 p.
- Girs A.A. *Mnogoletnie kolebaniya atmosfernoï tsirkulyatsii i dolgosrochnye meteorologicheskie prognozy* [Long-Term Fluctuations in Atmospheric Circulation and Long-Term Meteorological Forecasts]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1971. 280 p.
- Glasko M.P. The relationship of block morphostructures and modern movements of the flat-platform territory (using the example of the central part of the Russian Plain). *Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow, 1984. 253 p.
- Golosov V., Panin A. Century-scale stream network dynamics in the Russian Plain in response to climate and land use change. *CATENA*, 2006, vol. 66, pp. 74–92. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.07.011>
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:200 000. Izdanie vtoroe. Seriya Moskovskaya. List N-37-XVI (Ryazan’); N-37-XVII (Spassk-Ryazanskii). Ob’yasnitel’naya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200,000. Second edition. Moscow Series. Sheet N-37-XVI (Ryazan’); N-37-XVII (Spassk-Ryazanskii). Explanatory note]. Moscow: Moskovskii filial FGBU “VSEGEI”, 2021.
- Heklau H., Jetschke G., Bruelheide H., Seidler G., Haider S. Species-specific responses of wood growth to flooding and climate in floodplain forests in Central Germany. *iForest — Biogeosc. For.*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 226–236. <https://doi.org/10.3832/for2845-012>
- Hurrell J.W., Van Loon H. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Clim. Change*, 1997, vol. 36, pp. 301–326. <https://doi.org/10.1023/A:1005314315270>
- Isaev V.A., Belobrov V.P., Ivanov A.L. Dynamics of soil formation factors and their influence on agricultural technology in the Kamennaya Steppe. *Byull. Pochven. Inst. Dokuchaeva*, 2020, no. 104, pp. 5–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-5-30>
- Ivanov A.P. *Ot vesny do vesny. Zapiski fenologa: po rezul’tatam nablyudenii za sezonnym razvitiem prirody za 50 let XX veka (1950–2000 gg.)* [From Spring to Spring. Phenologist Notes: Based on the Results of the Nature Seasonal Development Observations over 50 Years of the Twentieth Century (1950–2000)]. 2005. 136 p.
- Ivanov V.V. Comparative analysis of the water regime of the floodplain and upland oak forests of the Tellerman massif. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Moscow: Lab. For. Sci., Acad. Sci. USSR, 1991. 22 p.
- Kasper J., Leuschner C., Walentowski H., Petritan A.M., Weigel R. Winners and losers of climate warming: Declining growth in *Fagus* and *Tilia* vs. stable growth in three *Quercus* species in the natural beech-oak forest ecotone (western Romania). *For. Ecol. Manage.*, 2022, vol. 506, no. 12, art. 119892. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119892>
- Khasanov B.F., Sakulina G.A. Factors determining the synchronous decrease in the growth of pedunculate oak (on the example of the Tula region). In *Zasukhi Vostochno-Evropeiskoi ravniny po gidrometeorologicheskim i dendrokronologicheskim dannym* [Droughts of the East European Plain According to Hydrometeorological and Dendrochronological Data]. Solomina O.N., Ed. Moscow, St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2017, pp. 183–193. (In Russ.).

- Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR* [Classification and Diagnostics of Soils of the USSR]. Egorov V.V., Fridland V.M., Ivanova E.M., et al., Eds. Moscow: Kolos Publ., 1977. 225 p.
- Kolomyts E.G. *Regional'naya model' global'nykh izmenenii prirodnoi sredy* [Regional Model of Global Changes in the Natural Environment]. Moscow: Nauka Publ., 2003. 371 p.
- Kolomyts E.G. Local humidify factors and their importance for the ecological prognoses. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2010, no. 5, pp. 61–72. (In Russ.).
- Krivtsov V.A., Tobratov S.A., Vodorezov A.V., Komarov M.M., Zheleznova O.S., Solov'eva E.A. *Prirodnyi potentsial landshaftov Ryazanskoi oblasti* [The Natural Potential of the Ryazan Region Landscapes]. Krivtsov V.A., Tobratov S.A., Eds. Ryazan: Izd-vo Ryaz. Gos. Univ., 2011. 768 p.
- Kuster T.M., Arend M., Günthardt-Goerg M., Schulin R. Root growth of different oak provenances in two soils under drought stress and air warming conditions. *Plant Soil*, 2013, vol. 369, pp. 61–71.
<https://doi.org/10.1007/s11104-012-1541-8>
- Legout A., Hansson K., Van der Heijden G., Laclau J.-P., Mareschal L., Nys C., Nicolas M., Saint-André L., Ranger J. Chemical fertility of forest ecosystems. Part 2: Towards redefining the concept by untangling the role of the different components of biogeochemical cycling. *For. Ecol. Manage.*, 2020, vol. 461, art. 117844.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117844>
- Maksimov S.A., Marushchak V.N. Towards a theory of population dynamics of the gypsy moth in the Urals. *Agrarn. Vestn. Urala*, 2011, vol. 88, no. 9, pp. 13–16. (In Russ.).
- Maksimov S.A., Marushchak V.N., Andreev G.V. On the biological nature of outbreaks of phytophagous insects (on example of gypsy moth *Lymantria dispar* (L.) (Lepidoptera, Lymantriidae)). *Byull. Mosk. O-va Ispyt. Prir. Otd. Biol.*, 2022, vol. 127, no. 5, pp. 21–33. (In Russ.).
- Markov V.A. Ecology and dynamics of the number of forest insects in Central Russia. *Dr. Sci. (Biol.) Dissertation*. Ryazan: Izd-vo Ryazan. Gos. Ped. Univ., 2004. 351 p.
- Maslyaev V.N. Lithogenic basis of landscape as an object of geocological research. *Byull. Mordovskogo Univ.*, 2008, no. 1, pp. 119–123. (In Russ.).
- Matisons R., Elferts D., Brūmelis G. Pointer years in tree-ring width and earlywood-vessel area time series of *Quercus robur* — relation with climate factors near its northern distribution limit. *Dendrochronologia*, 2013, vol. 31, pp. 129–139.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.10.001>
- Matskovsky V.V., Lomakin N.A., Matveev S.M. Pointer years in the rows of annual ring widths of pine trees in the Voronezh region. In *Zasukhi Vostochno-Evropeiskoi ravniny po gidrometeorologicheskim i dendrokronologicheskim dannym* [Droughts of the East European Plain According to Hydrometeorological and Dendrochronological Data]. Solomina O.N., Ed. Moscow, St. Petersburg: Nestor-Istoriya Publ., 2017, pp. 203–207. (In Russ.).
- McCormack M.L., Guo D. Impacts of environmental factors on fine root lifespan. *Front. Plant Sci.*, 2014, vol. 5, art. 205.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00205>
- Mikac S., Žmegač A., Trlin D., Paulić V., Oršanić M., Anić I. Drought-induced shift in tree response to climate in floodplain forests of Southeastern Europe. *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, no. 1, art. 16495.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-34875-w>
- Mnogoletnie izmeneniya elementov vodnogo balansa na vodnobilansovykh i bolotnykh stantsiyakh: nauchno-prikladnoi spravochnik* [Long-Term Changes in Water Balance Elements at Water Balance and Swamp Stations: Scientific and Applied Reference]. Markov M.L., Ed. St. Petersburg: RIAL Publ., 2021. 202 p.
- Neuwirth B., Esper J., Schweingruber F.H., Winiger M. Site ecological differences to the climatic forcing of spruce pointer years from the Lötschental, Switzerland. *Dendrochronologia*, 2004, vol. 21, pp. 69–78.
<https://doi.org/10.1078/1125-7865-00040>
- Niinemets Ü., Valladares F. Tolerance to shade, drought and waterlogging in the temperate dendroflora of the northern hemisphere: tradeoffs, phylogenetic signal and implications for niche differentiation. *Ecol. Monogr.*, 2006, vol. 76, no. 4, pp. 521–547.
<https://doi.org/10.1016/b978-008045405-4.00826-0>
- Oosterbaan A., Nabuurs G.J. Relationships between oak decline and groundwater class in the Netherlands. *Plant Soil*, 1991, vol. 136, no. 1, pp. 87–93.
<https://doi.org/10.1007/BF02465223>
- Organova N.M., Voiloshnikov V.D. Modern ideas about the geological structure of the Ryazan region. In *Ryazanskii kraj: istoriya, priroda, khozyaistvo* [Ryazan Region: History, Nature, Economy]. Ryazan: Izd-vo Ryazan. Gos. Ped. Inst., 1991, pp. 178–193. (In Russ.).
- Persson H., Fircks Y.V., Majdi H., Nilsson L.O. Root distribution in a norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand subjected to drought and ammonium-sulphate application. *Plant Soil*, 1995, vol. 168–169, no. 1, pp. 161–165.
<https://doi.org/10.1007/BF00029324>
- Romanovsky M.G., Mamaev V.V. Subsoil waters in upland oak stands of the Tellerman forest. *Lesoved.*, 2002, no. 5, pp. 6–11. (In Russ.).
- Rumyantsev D.E., Cherakshev A.V. Methodological approaches for determining the age of trees. *Printsipy Ekol.*, 2020, vol. 9, no. 4, pp. 104–117. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15393/j1.art.2020.10142>

- Rychagov G.I. Fluctuations of the Caspian Sea level: causes, effects, forecast. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2011, no. 2, pp. 4–12. (In Russ.).
- Rysin L.P., Rysina G.P. Common oak. In *Biologicheskaya flora Moskovskoi oblasti* [Biological Flora of the Moscow Region]. Pavlov V.N., Rabotnov T.A., Tikhomirov V.N., Eds. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 1990, pp. 102–130. (In Russ.).
- Sadokov V.P., Kozel'tseva V.F., Kuznetsova N.N. Analysis of summer droughts in 1972, 1975, 1984 and 2002. *Tr. Gidrometeorol. Nauch.-Issled. Tsentra Ross. Fed.*, 2008, no. 342, pp. 23–36. (In Russ.).
- Savichev A.I., Mironicheva N.P., Tsepelev V.Yu. Atmospheric circulation characteristics of the northern hemisphere Atlantic-Eurasian sector for last decades. *Uch. Zap. Ross. Gos. Gidrometeorol. Univ.*, 2015, no. 39, pp. 120–131. (In Russ.).
- Scharnweber T., Smiljanic M., Cruz-García R., Manthey M., Wilmking M. Tree growth at the end of the 21st century — the extreme years 2018/19 as template for future growth conditions. *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 15, no. 7, art. 074022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab865d>
- Šenfeldr M., Horák P., Kvasnica J., Šrámek M., Hornová H., Maděra P. Species-specific effects of groundwater level alteration on climate sensitivity of floodplain trees. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 9, art. 1178. <https://doi.org/10.3390/f12091178>
- Shivareva S.P., Lee V.I., Golubtsov V.V. Modeling the Caspian Sea level taking into account water consumption and under changing climate conditions. *Gidrometeorol. Ekol.*, 2013, no. 1, pp. 83–101. (In Russ.).
- Smirnov S.I. Assessment of the diversity and condition of regional and local populations of tree species — the main edificers and dominants of the modern forest belt. In *Vostochnoevropeiskie lesa: istoriya v golotsene i sovremennost'. Kn. 1* [Eastern European Forests: History in the Holocene and Modernity. Book 1]. Smirnova O.V., Ed. Moscow: Nauka Publ., 2004, pp. 324–337. (In Russ.).
- Smirnov N.P., Vorob'ev V.N., Kachanov S.Yu. *Severo-Atlanticheskoe kolebanie i klimat* [North Atlantic Oscillation and Climate]. St. Petersburg: RGGMU Publ., 1998. 122 p.
- Solntsev N.A. *Uchenie o landshafte: Izbrannye trudy* [The Doctrine of Landscape: Selected Works]. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 2001. 383 p.
- Solntsev V.N. On the gravitational paradigm of landscape science In *Landshaftnyi sbornik (Razvitie idei N.A. Solntseva v sovremenном landshaftovedenii)* [Landscape Collection (Development of Ideas of N.A. Solntsev in Modern Landscape Science)]. Moscow, Smolensk: Oikumena Publ., 2013, pp. 155–169. (In Russ.).
- Solomina O.N., Kuznetszova V.V., Matskovskii V.V., Dolgova E.A. What determines the width of annual tree-rings in the central part of East-European plain? *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2016, no. 3, pp. 47–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-3-47-64>
- Spiridonov A.I. *Geomorfologiya Evropeiskoi chasti SSSR* [Geomorphology of the European part of the USSR]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1978. 335 p.
- Tishin D.V., Chizhikova N.A. *Dendrokronologiya: uchebno-metodicheskoe posobie* [Dendrochronology: An Educational and Methodological Guide]. Kazan: Izd-vo Kazan. Univ., 2018. 34 p.
- Tumajer J., Trembl V. Influence of artificial alteration of groundwater level on vessel lumen area and tree-ring width of *Quercus robur*. *Trees*, 2017, vol. 31, no. 6, pp. 1945–1957. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1598-3>
- Usol'tsev V.A. *Fitomassa lesov Severnoi Evrazii: normativy i elementy geografii* [Forest Biomass of Northern Eurasia. Mensuration Standards and Geography]. Ekaterinburg: Izd-vo UrO RAN, 2002. 762 p.
- Usol'tsev V.A. In basements of the biosphere: what we know about the primary production of tree. *Eko-Potents.*, 2018, 4, no. 24, pp. 25–79. (In Russ.).
- Van Mantgem P.J., Stephenson N.L., Byrne J.C., Daniels L.D., Franklin J.F., Ful'e P.Z., Harmon M.E., Larson A.J., Smith J.M., Taylor A.H., Veblen T.T. Widespread increase of tree mortality rates in the Western United States. *Science*, 2009, vol. 323, no. 5913, pp. 521–524. <https://doi.org/10.1126/science.1165000>
- Vospersnik S., Heym M., Pretzsch H., et al. Tree species growth response to climate in mixtures of *Quercus robur/Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* across Europe — a dynamic, sensitive equilibrium. *For. Ecol. Manage.*, 2023, vol. 530, art. 120753. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120753>
- Wilmking M., van der Maaten-Theunissen M., van der Maaten E., Scharnweber T., Buras A., Biermann C., Gurskaya M., Hallinger M., Lange J., Shetti R., Smiljanic M., Trouillier M. Global assessment of relationships between climate and tree growth. *Glob. Chang. Biol.*, 2020, vol. 26, no. 6, pp. 3212–3220. <https://doi.org/10.1111/gcb.15057>
- Zheleznova O.S. Complex assessment of biogeochemical ecosystem stability in the conditions of technogenesis (on the example of subtaiga forests of the South Meshchera). *Cand. Sci. (Biol.) Dissertation*. Moscow: RUDN, 2017. 297 p.
- Zheleznova O.S., Tobratov S.A. Landscape Analysis Experience of Spatial Patterns of Zonal Ecosystems Productivity: A Case Study of Subtaiga Forests of Southern Meshchera. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2017, no. 6, pp. 47–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0373244417060056>