

DOI 10.31509/2658-607x-2020-3-3-1-25
УДК 502:504:573:574

**НАУКА В АВАНГАРДЕ ПЕРЕОСМЫСЛЕНИЯ РОЛИ ЛЕСОВ В ТРЕТЬЕМ
ТЫСЯЧЕЛЕТИИ: КОММЕНТАРИИ К ПРОЕКТУ КОНЦЕПЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗАКОНА «ЛЕСНОЙ КОДЕКС РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»**

© 2020 г. А.М. Макарьева^{1*}, А.В. Нефёдов^{1*}, В.Е. Морозов², А.А. Алейников³, Р.Г. Васильев⁴

¹Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Россия, 188300 Ленинградская обл., Гатчина, Орлова Роща, 1

²Общественный совет при Федеральном агентстве лесного хозяйства
Россия, 115184 Москва, ул. Пятницкая, 59/19

³Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Россия, 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14

⁴Общество биотехнологов России им. Ю.А. Овчинникова
Россия, 119071 Москва, Ленинский пр., 33, стр. 2

*E-mail: ammakarieva@gmail.com; anef@thd.pnpi.spb.ru

Поступила в редакцию 01.10.2020

Принята к печати 19.10.2020

В данной работе в свете последних научных данных с позиции концепции биотической регуляции окружающей среды рассматриваются аспекты регулирующего влияния лесных экосистем на климат: поглощение углерода в биомассе деревьев и почве, регуляция локального температурного режима через транспирацию и отражательную способность лесного покрова, регуляция континентального транспорта атмосферной влаги и облачности. Показано, что в условиях нарастающей климатической дестабилизации значение климаторегулирующей функции лесов и, в особенности, её аспектов, связанных с круговоротом влаги, быстро увеличивается по сравнению с традиционными хозяйственными функциями леса. Лесной кодекс, как основной документ, регулирующий воздействие граждан России на лес, должен учитывать динамично развивающуюся ситуацию и отвести климаторегулирующим лесам особую роль. Учитывая, что естественные лесные экосистемы имеют ограниченную устойчивость и климаторегулирующий потенциал, которые изъятие древесины в коммерческих масштабах и другие способы эксплуатации могут полностью разрушить, достижение баланса между хозяйственной и климаторегулирующей функциями лесов предлагается осуществить через пространственное разграничение. Хозяйственную деятельность необходимо интенсивно вести на ранее освоенных территориях, подвергнутых запороговому воздействию. Малонарушенные леса, осуществляющие климаторегулирующую функцию, предлагается выделить в отдельную юридическую категорию, подлежащую только защите и интенсивному изучению. Показано, что включение категории климаторегулирующих лесов в международную климатическую повестку необходимо для защиты национальных интересов России.

Ключевые слова: биотическая регуляция окружающей среды, климат, углерод, водный режим, облачность, биота, биогены, экосистемы, пожары, климаторегулирующие леса, малонарушенные леса.

Современная наука генерирует новое знание, – а современный мир трансформируется, – с беспрецедентной скоростью. Это требует адекватной гибкости от стратегий управления во всех сферах жизни общества. Успешная стратегия должна в идеале превосходить тенденции развития в своей области, обладать информационной восприимчивостью и способностью к видоизменению. Одними из наиболее быстро меняющихся и важнейших для жизни людей являются представления о климате и о роли в его поддержании растительного покрова.

В этом отношении безусловно позитивным моментом, отвечающим динамично развивающейся ситуации, является включение в проект концепции федерального закона «Лесной кодекс Российской Федерации» (Гагарин, 2020), подготовленного рабочей группой Научного совета РАН по лесу, нового понятия – климаторегулирующей функции лесов. В настоящем комментарии мы кратко охарактеризуем свое видение последних научных результатов, обуславливающих смысловое наполнение этого нового понятия и его дальнейшее развитие, которое, по нашему мнению, должно привести к законодательному закреплению категории климаторегулирующих малонарушенных лесов, подлежащих изучению и охране на уровне приоритетной национальной программы. Мы приводим аргументы в пользу того, что введение этой категории не только является ключевым моментом в обеспечении долгосрочной экологической безопасности нашей страны, но и отвечает её сегодняшним экономическим и политическим интересам в мире, где международная климатическая повестка неразрывно связана с экономикой и политикой.

Влияние леса на климат: критические факторы и неопределённости
Углерод: накопление в почве малонарушенных лесов?

Современная цивилизация потребляет энергию из двух основных источников – ископаемого топлива и биомассы. Сжигание ископаемого топлива

выбрасывает в атмосферу около 9 ГтС/год, к которым прибавляется ещё по крайней мере 2 ГтС/год от разрушения органических запасов биосферы (деградация почв и уничтожение лесов) (данные приведены с точностью до 0.5 ГтС/год (Friedlingstein et al., 2019)). Около половины этих выбросов, 5 ГтС/год, остаются в атмосфере в виде парникового газа CO₂, концентрация которого растёт. Растёт и среднеглобальная температура земной поверхности. Эти проявления климатической неустойчивости вызывают озабоченность и широко обсуждаются в мире.

К настоящему моменту концентрация атмосферного CO₂ выросла на треть по сравнению с доиндустриальной эпохой и вышла из равновесия с CO₂, растворённым в океане. Стремясь к восстановлению равновесия, океан поглощает из атмосферы около 2 ГтС/год в неорганической форме. Судьба оставшихся 4 ГтС/год (так называемый “недостающий сток” или “missing sink”) долгое время оставалась загадкой, хотя, казалось бы, можно было сразу принять во внимание роль биосферы. Глобальная биота синтезирует органику со скоростью около 100 ГтС/год и в стационарном состоянии с такой же скоростью её разлагает. Эта величина на порядок превышает мощность антропогенных выбросов углерода.

Если в качестве главного принципа организации жизни принять концепцию биотической регуляции окружающей среды, то существование биотического стока атмосферного углерода очевидно. Естественная биота должна реагировать на возмущение окружающей среды – антропогенные выбросы CO₂ – в соответствии с принципом Ле Шателье (Горшков, 1995). Она должна препятствовать накоплению CO₂ и убирать излишний углерод из атмосферы, переводя его в инертную органическую форму. Для объяснения недостающего стока в 4 ГтС/год достаточно четырёхпроцентного превышения глобальной мощности фотосинтеза над разложением органики. Углерод является основным элементом, используемым жизнью, поэтому, даже

если бы CO₂ не являлся парниковым газом, биота должна была бы компенсировать происходящие отклонения его концентрации от оптимального значения.

Признанию глобального биотического стока углерода научным сообществом длительное время препятствовали господствовавшие представления о том, что биота не регулирует концентрации жизненно важных веществ, а лимитируется ими. Поскольку концентрации азота и фосфора – предполагаемых лимитирующих биогенов – не меняются, то, с точки зрения экологов, с увеличением концентрации атмосферного CO₂ продуктивность биосферы расти не могла (Popkin, 2015). В то же время концепция биотической регуляции предсказывала, что при постоянном азоте и фосфоре стабилизирующий ответ биоты должен принять форму добавочного синтеза углеводов, которые азота и фосфора не содержат (Gorshkov, 1986).

Только после прямых измерений, доказавших увеличение биомассы растений в разных частях планеты, специалистам пришлось признать, что стабилизирующий ответ биоты на углеродное возмущение существует¹. “Недостающий сток” был приписан главным образом к увеличению массы древесины в лесных экосистемах (Pan et al., 2011).

Однако биомасса лесных деревьев не может нарастать неограниченно (Hubau et al., 2020). Сохранение биотического стока возможно в том случае, если после гибели старых деревьев их органическое вещество не подвергнется разложению полностью и частично депонируется в почве в виде долгоживущих органических соединений. Современные исследования показали, что время жизни органических соединений в почве определяется не их химическим составом, а тем, как функционирует всё экологическое сообщество, включая

растения и почвенную биоту (Schmidt et al., 2011; Gross, Harrison, 2019; Kuznetsova et al., 2019).

Согласно концепции биотической регуляции, нарушенные экологические сообщества дестабилизируют окружающую среду и этим принципиально отличаются от сообществ естественных экосистем. Примером такой дестабилизации служит деградация сельскохозяйственных почв, которая даёт ощутимый вклад в глобальные выбросы углерода. Однако мониторинг состояния почв происходит преимущественно в развитых странах в тех районах, где ведётся сельское хозяйство. Измерения динамики содержания органического углерода в двух главных резервуарах, почве и океане, являются намного более трудоёмкими и дорогостоящими, чем измерения увеличения биомассы деревьев. Долгосрочных программ по детальному изучению динамики почвенного углерода в естественных малонарушенных лесах мира, значительная часть которых находится на территории России, практически нет (Smith et al., 2020), хотя имеющиеся как глобальные, так и региональные данные указывают на то, что стабилизирующий ответ этих экосистем должен быть значительным (Luysaert et al., 2008; Kuznetsova et al., 2019; Lukina et al., 2020).

Исследования временных последовательностей ненарушенных лесов показали, что такие леса способны в течение нескольких тысяч лет при постоянной наземной биомассе обеспечивать сток атмосферного углерода в почву на уровне порядка 1% первичной продуктивности, или около 5 гС м⁻² год⁻¹ в бореальной экосистеме (Wardle et al., 2012). Однако современное увеличение концентрации атмосферного CO₂ может, по-видимому, усилить стабилизирующий ответ по крайней мере на порядок до 50 гС м⁻² год⁻¹ и более (Zhou et al., 2006; Kittler et al., 2017). Для корректной оценки этого эффекта требуются круглогодичные долгосрочные наблюдения (Kittler et al., 2017).

¹ Этот эффект теперь называется “CO₂-fertilization”, что в английском языке имеет один корень со словом “удобрения” (fertilizers), хотя, в отличие от азота и фосфора, неорганический углерод в качестве удобрения для повышения продуктивности растений не используется.

Отсутствие адекватного учёта динамики почвенного углерода в ненарушенных лесах и других ненарушенных экосистемах приводит к потенциальной недооценке негативного воздействия на углеродный баланс преобразования экосистемы из ненарушенного состояния в нарушенное, в частности, с нарушением водного режима (Kittler et al., 2017; Sheil et al., 2019; Mayer et al., 2020). Если малонарушенные леса России обеспечивают почвенный сток атмосферного углерода, то превращение выделенного участка ненарушенного леса в нарушенный эксплуатируемый участок с лесными культурами с *большой чистой первичной продуктивностью* приведёт к увеличению выбросов углерода в атмосферу за счёт замены стабилизирующего воздействия (поглощения углерода естественным лесом) на дестабилизирующее (потерю почвенного углерода нарушенной экосистемой) (Dean et al., 2017). Масштабная научная программа по исследованию потенциала малонарушенных лесов как накопителей почвенного углерода позволит объективно оценить роль лесов России в поддержании устойчивости химического состава атмосферы.

Испарение влаги лесом: критическое влияние на температурный режим

Поглощение углекислого газа растениями происходит в процессе фотосинтеза. Чтобы захватить молекулу углекислого газа из атмосферы, устьица зелёных листьев раскрываются. При этом в атмосферу из листа испаряются молекулы водяного пара – более сотни молекул воды на каждую поглощённую молекулу углекислого газа. Этот процесс называется транспирацией. Испарение требует затрат энергии – молекулу H_2O необходимо вырвать из жидкой фазы, преодолев межмолекулярные силы притяжения. При транспирации значительная часть энергии солнечного излучения тратится на преодоление энергии связи молекул воды, а не на нагрев поверхности. Поэтому температура поверхности фотосинтезирующих зелёных листьев и лесного полога при прочих равных условиях

оказывается существенно ниже температуры сухой поверхности с той же освещённостью (Huryna, Pokorný, 2016).

Эти процессы составляют основу физиологии растений и хорошо известны (Chapin et al., 2008). Однако лишь недавно с использованием глобальных спутниковых данных удалось оценить масштаб их влияния на континентальный температурный режим (Alkama, Cescatti, 2016). Выяснилось, что сведение лесного покрова приводит к повышению локальной температуры земной поверхности в вегетативный сезон на несколько градусов по сравнению с участками, где лесной покров сохраняется. Этот локальный незамедлительный эффект от уничтожения леса сравним с моделируемым глобальным потеплением от удвоения концентрации атмосферного углекислого газа за сто лет.

Важность этих новых результатов состоит в раскрытии связи между локальной практикой лесопользования и частотой пожаров. Повышение температуры является одним из основных факторов пожароопасности (Furyaev et al., 2001). Теряет смысл традиционное деление факторов пожароопасности на климатические (climate change) и связанные с землепользованием (land-use) (Molinari et al., 2018). Исследователи различных экосистем по всему миру приходят к выводу о том, что повышение частоты пожаров не является внешним климатическим фактором для леса, а может напрямую обуславливаться предысторией нарушений лесного покрова, как природных, так и антропогенных, включая рубку леса и пожары (Aleinikov, 2019; Sheil, 2020). Повышая температуру поверхности, рубки и пожары повышают вероятность последующих пожаров независимо от характера источника возгорания. Первопричиной беспрецедентного по интенсивности режима пожаров в Сибири может быть антропогенное нарушение лесного покрова (Feurdean et al., 2020). Дефицит влаги приводит к ослаблению оставшихся деревьев, которые оказываются подверженными вредителям,

включая инвазивные виды (Hesslerová et al., 2018).

Важнейшей задачей является изучение способности ненарушенных и малонарушенных лесов сохранять почвенную влагу. В зарубежной литературе этим вопросам уделяется всё большее внимание (Ilstedt et al., 2016). Для бореальных лесов также известно, что даже относительно поздние сукцессионные стадии существенно различаются между собой по способности стабилизировать почвенную влагу (Смирнова и др., 2014).

Для обеспечения эффективной охраны современных лесов необходимо систематически, в масштабе всей страны изучить связь между долгосрочной историей антропогенного воздействия на экосистемы, их способностью накапливать и сохранять почвенную влагу и частотой возникновения в них пожаров. Это позволит минимизировать антропогенные нарушения и, следовательно, частоту пожаров в ещё сохранившихся наиболее устойчивых малонарушенных лесах и использовать знания об этих эталонных системах для уменьшения пожароопасности в эксплуатируемых древостоях.

Континентальный транспорт атмосферной влаги

Исследования последних лет выявили новый существенный фактор влияния лесов на климат. Транспирация лесного покрова поддерживает в атмосфере высокую влажность, определяющую интенсивность локальной конденсации и осадков. Конденсация водяного пара приводит к образованию градиентов давления, способствующих переносу атмосферной влаги с океана на сушу в континентальных масштабах (Makarieva et al., 2014; Poveda et al., 2014). На основании исследований радиоактивных изотопов в осадках было показано, что естественный лес бассейна Амазонки функционирует таким образом, что дождевой сезон удлиняется на два месяца по сравнению с безлесными регионами на той же широте. Транспирация влаги лесным покровом и конденсация влаги над лесом приводит к засасыванию влажного воздуха с океана вглубь континента (Wright et al., 2017).

Аналогичные результаты были получены для муссонов в Индии (Pradhan et al., 2019).

Существование лесного насоса атмосферной влаги было теоретически предсказано российскими учёными (Makarieva, Gorshkov, 2007; Makarieva et al., 2013). В России подобных экспериментальных исследований не проводилось – несмотря на то, что лесной биотический насос критически важен для России, имеющей максимальную в мире континентальную протяжённость. Исходя из концепции биотической регуляции, естественный лесной покров не только обеспечивает компенсацию речного стока в океан притоком влаги через атмосферу, но и решает сложнейшую задачу по оптимизации осадков таким образом, чтобы минимизировать экстремальные нарушения круговорота воды в виде засух и наводнений. Биотическое управление происходит путём равномерной инициации естественным лесом конденсации и осадков в пространстве и во времени. Например, было установлено, что в естественных тропических лесах при очень высоких среднегодовых осадках в гористом рельефе нет оползней и эрозии почвы, поскольку осадки происходят в виде регулярных дождей низкой интенсивности (Sillitoe, 1993).

Лесной покров России за последние двести лет изменялся неравномерно. Эксплуатация лесных ресурсов зависела от множества историко-географических и социально-экономических факторов и могла отличаться даже в пределах одного административного региона (Алейников и др., 2018). В целом, в девятнадцатом веке экспоненциальный рост населения приводил к снижению площади лесов за счёт расширения сельскохозяйственных земель. Индустриальная революция привела к дополнительному увеличению нагрузки на лесные системы в связи с использованием древесины в качестве источника энергии. Доля лесного покрова в европейской России и Северной Америке в 19-м веке резко снижалась, достигнув своего минимума в период перехода цивилизации на ископаемое топливо

(Макарьева, Горшков, 2018). В европейской части России этот минимум пришёлся, по-видимому, на начало двадцатого века (Цветков, 1957; Паленова, 2004). Увеличение эффективности сельского хозяйства, урбанизация и прекращение использования древесины в качестве основного вида топлива в двадцатом веке снизило нагрузку на лес и привело к увеличению лесистости в европейской части России по сравнению с минимумом начала века. За этот период вырос и арктический сток европейских рек (Magritsky et al., 2018). Речной сток в стационарном случае равен притоку атмосферной влаги с океана. Рост речного стока означает усиление континентального транспорта атмосферной влаги с увеличением лесного покрова.

Однако одновременно с уменьшением сельскохозяйственного давления на лес, начиная с 30-х и вплоть до конца 70-х годов двадцатого века возрастал объём промышленных рубок. Так, с 1929 по 1940 г. объём лесозаготовок в России увеличился в 2.6 раза. В годы войны объём сократился, но уже в 1948 году был восстановлен, достиг своего максимума около 350 млн. м³ в год в середине 1970-х годов и только в 1990-х годах резко снизился (Замолотчиков и др., 2015). С этого времени отмечается увеличение лесопокрываемой территории во всех восточноевропейских странах (за исключением Эстонии и Латвии) и большинстве регионов России (Turubanova et al., 2017). Несмотря на то, что за последние двести лет интенсивность антропогенного давления на лес изменялась неравномерно (как уменьшалась, так и возрастала), относительная площадь ненарушенных лесов, по-видимому, неуклонно уменьшалась, так как увеличение площади лесов происходит за счёт молодых древостоев, а уменьшение – в основном, за счёт зрелого леса.

Учитывая влияние растительного покрова на температуру земной поверхности и все компоненты водного режима, а также сложные обратные связи между функционированием экосистем разной степени нарушенности и

состоянием круговорота воды, для корректного прогнозирования континентального водного режима, включая речной сток, осадки, экстремальные погодные явления и запасы почвенной влаги (Groisman et al., 2017; Magritsky et al., 2018; Gu et al., 2019; Chernokulsky et al., 2019, 2020), необходимо принимать во внимание региональную динамику состояния лесных экосистем.

Отражательная способность лесного покрова и облачность

Атмосфера относительно прозрачна для солнечной радиации. Часть солнечной радиации, достигающей поверхности земли, не поглощается, а отражается обратно в космос. Чем светлее поверхность, тем больше её отражательная способность (альbedo). Более тёмный лесной покров поглощает больше солнечного излучения, чем снежный покров. За счёт эффекта альbedo сведение лесов приводит к уменьшению температур в холодный сезон. В вегетативный сезон влияние альbedo перекрывается влиянием транспирации, поэтому на вырубках, несмотря на более высокое альbedo, температура поверхности повышается по сравнению с ненарушенным лесом (Mamkin et al., 2019). Таким образом, сведение лесов в бореальной зоне приводит к дестабилизации локального температурного режима – уменьшению температуры зимой и увеличению температуры летом (Alkama, Cescatti, 2016).

Около 20% солнечного излучения отражается обратно в космос облачностью. Это охлаждает Землю – поэтому, например, облачный день летом прохладнее безоблачного. С другой стороны, облачность поглощает тепловое излучение земной поверхности и частично переиспускает его обратно к поверхности. Это нагревает Землю – поэтому, например, облачная ночь теплее безоблачной. Эти противоположные эффекты делают облачность главным регулятором температурного режима планеты. Различные виды облачности оказывают преимущественно нагревающее или охлаждающее влияние. Так, например,

низкая облачность преимущественно охлаждает, а высокая тонкая облачность – нагревает. Испарение с поверхности лесного покрова поддерживает высокое влагосодержание атмосферы, необходимое для образования облаков. Биотический контроль облачности с использованием двух рычагов (похолодания и потепления) позволяет лесу стабилизировать температурный режим (Горшков, Макарьева, 2006).

Глобальные климатические модели последнего поколения предсказывают значительно большее потепление при удвоении концентрации углекислого газа, более четырёх с половиной градусов Цельсия вместо трёх, вплоть до почти шести градусов в некоторых моделях (Zelinka et al., 2020). Для некоторых моделей увеличение по сравнению с

предыдущим поколением составило около двух градусов, что сопоставимо по величине с полным глобальным потеплением, оцениваемым российской глобальной климатической моделью Института вычислительной математики РАН (Zelinka et al., 2020). Такое изменение связано с более детальным учётом зависимости облачности, особенно в высоких широтах, от температуры. Эти зависимости формулируются на основе наблюдений. Исчезновение малонарушенных лесов, задокументированное в последние два десятилетия (Heino et al., 2015; Potapov et al., 2017), могло привести к изменениям характеристик осадков и облачности, которые, как показывают новейшие исследования, могут иметь серьёзные глобальные последствия.

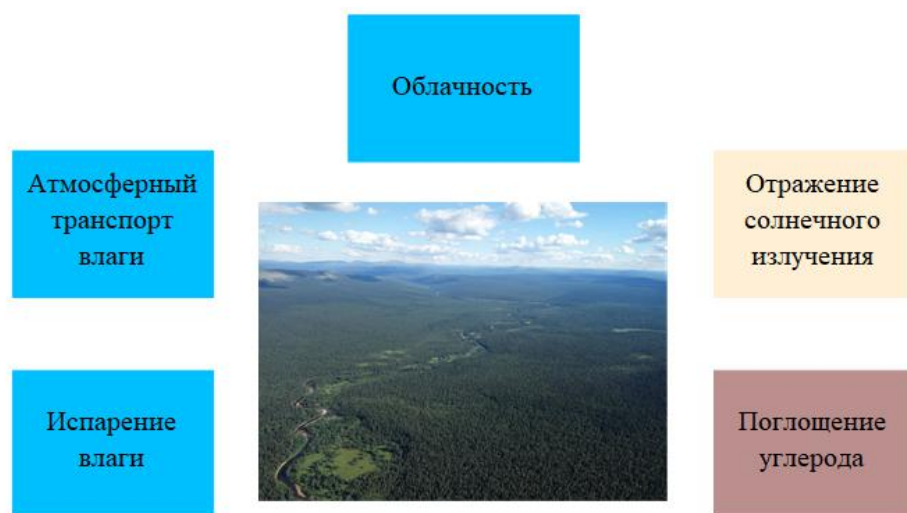


Рисунок 1. Некоторые аспекты влияния леса на климат. Традиционное рассмотрение было сосредоточено на поглощении углерода в биомассе деревьев при отсутствии информации о почвенной динамике, впоследствии к этому рассмотрению добавилось альbedo (Andrews et al., 2017; Anderegg et al., 2020). Аспекты, связанные с круговоротом воды (голубые прямоугольники), наименее изучены, но, согласно последним данным, играют ключевую роль в климатической устойчивости (Sheil et al., 2019; Zelinka et al., 2020).

Климаторегулирующие леса – малонарушенные леса

Необходимо подчеркнуть принципиальное различие между понятиями *регуляция* (стабилизация) климата и окружающей среды и *влияние* на них, которое может быть как стабилизирующим, так и дестабилизирующим. Регуляция заключается в обеспечении

стабилизирующего воздействия, которое направлено на компенсацию возмущений и возвращение климата и окружающей среды в оптимальное для жизни состояние. Например, при повышении температуры для стабилизации температурного режима естественный ненарушенный лесной покров может способствовать образованию более низкой “охлаждающей”

облачности, а при понижении температуры – более высокой облачности, оказывающей нагревающее воздействие. Подобная регуляция – сложнейший процесс, основанный на взаимодействиях между видами, сформировавшимися за миллионы лет эволюции. Современные исследования показывают, что в продукции аэрозолей, служащих ядрами конденсации при образовании облачности, участвуют не только деревья, но и всё экологическое сообщество, включая микроорганизмы (Pöschl et al., 2010; Sheil, 2018).

Лес, нарушенный пожарами и рубками, расходует свою мощность на самовосстановление, поэтому его потенциал по регуляции внешней окружающей среды понижен, и такой лес может дестабилизировать окружающую среду. Когда площадь нарушенных лесов мала, это не оказывает существенного влияния на устойчивость регионального климата, которую обеспечивает ненарушенный естественный лес. Однако с увеличением нарушенных площадей и с уменьшением доли естественных лесов дестабилизация климата также будет нарастать. В этом контексте обращает на себя внимание долгосрочная тенденция уменьшения низкой облачности на территории России (Khlebnikova, Sall, 2009).

Влияние леса на климат базируется на множестве физических, биохимических и экологических процессов со сложными обратными связями (рис. 1), причём во всех аспектах биотическая регуляция влаги является ключевым фактором (Sheil et al., 2019). Так, образование облачного покрова тесно связано с атмосферным транспортом влаги, который, в свою очередь, зависит от испарения влаги лесом (Wright et al., 2017; Pradhan et al., 2019). Эффективное накопление углерода в экосистеме невозможно при дефиците почвенной влаги, определяющей интенсивность фотосинтеза (Kittler et al., 2017).

С развитием компьютерной техники в науке об окружающей среде начал преобладать феноменологический модельный подход в ущерб концептуальному теоретическому подходу (Emanuel, 2020). Собранные эмпирические данные статис-

тически обрабатываются и выявленные формальные корреляции кладутся в основу моделируемых связей. Это не гарантирует научного понимания процессов, определяющих найденные корреляции и их динамику. Недостаточность и неэффективность такого подхода к исследованию сложнейших задач климатологии постепенно осознаётся и отмечается ведущими учёными (Belotelov, 2020; Emanuel, 2020).

Концепция биотической регуляции окружающей среды предоставляет необходимую междисциплинарную теоретическую основу для исследования воздействия экосистем на климат. Окружающая среда, в которой существует жизнь и, в частности, лесные экосистемы, находится в неравновесном физико-химическом состоянии. В отсутствие управления биотой она переходит в неблагоприятное для жизни состояние (распадается) на малом временном масштабе порядка нескольких лет. Естественная биота на основе использования солнечного излучения предотвращает спонтанный распад благоприятной для себя окружающей среды, увеличивая время её существования до геологических масштабов (Makarieva et al., 2020).

С точки зрения биотической регуляции, важнейшим динамическим параметром, различающим экосистемы, является степень их нарушенности, определяющая способность экосистемы к самовосстановлению в стационарное устойчивое состояние. Биологические виды существуют практически без изменений миллионы лет, а экосистемы – десятки миллионов лет. Это означает, что естественные экосистемы способны к восстановлению после нарушений. В естественных лесных экосистемах максимальна устойчивость по отношению к абиотическим (пожары, ветровалы) и биотическим (инвазии насекомых) возмущениям. Эти экосистемы имеют устойчивое распределение всех видов по поколениям (оконная динамика).

При запороговом (запредельном) нарушении экосистемы восстановления к устойчивому состоянию не происходит, а происходит необратимая утрата генофонда

вплоть до полного исчезновения леса (Kukavskaya et al., 2016). Необходимо различать экосистемы, находящиеся на траектории к деградации, от тех, которые способны к самовосстановлению до исходного устойчивого состояния с присутствием всех ключевых видов. Деградирующие экосистемы с очевидностью климат регулировать не могут.

В одновозрастном древостое, сформировавшемся после пожара или вырубке, все деревья достигают зрелого возраста и затем стареют практически одновременно. Если не предпринять никаких мер по их защите, то такие древостои отомрут, и сформировавшийся большой запас мёртвой древесины станет потенциальной угрозой пожаров и распространения вредителей (Hesslerová et al., 2018). При одновременном вывале большого числа деревьев повышается температура, понижается влажность, что ещё более повышает пожароопасность. Подобные древостои, испытавшие запороговое возмущение и требующие длительного самовосстановления, требуют антропогенного вмешательства.

Напротив, естественные экосистемы в отсутствие антропогенного воздействия устойчивы. В естественной ненарушенной экосистеме с развитой оконной динамикой присутствуют деревья всех видов и всех возрастов, включая максимальные для каждого вида. Возрастной состав популяций деревьев не меняется со временем (его можно сравнить с распределением по возрастам в здоровой популяции людей, где в любой момент присутствуют и дети, и взрослые, и старики). Гибель отдельных старых деревьев или куртин в естественной экосистеме локальна и не приводит к засушливости, поэтому пожароопасность остаётся низкой.

Важно отметить, что для обозначения естественных лесов в лесохозяйственной практике нет устоявшегося термина. Иногда используют термины “старовозрастные” или “переспелые”. Эти термины вводят в заблуждение, поскольку несмотря на то, что старые деревья в такой экосистеме всегда присутствуют, называть

её “переспелой” или “старовозрастной”, т.е. требующей антропогенного вмешательства, неправомерно. Такая экосистема практически бессмертна, как сама жизнь. Именно устойчивая экосистема обладает полной генетической информацией о процессах в регулируемой ею окружающей среде.

В современных исследованиях воздействия биоты на климат описываются рядом интегральных упрощённых параметров, таких как альbedo, содержание углерода, первичная продуктивность, шероховатость поверхности и пр. Однако при одних и тех же модельных параметрах реакции на изменения окружающей среды принципиально различаются у деградирующей экосистемы и у экосистемы, не потерявшей способности к самовосстановлению и сохраняющей всю полноту генетической информации о регуляции окружающей среды и климата. Это фундаментальное различие сегодня не принимается во внимание в климатических исследованиях (Groisman et al., 2017). В то же время разные исследователи независимо приходят к пониманию того, что малонарушенные устойчивые экосистемы выделены по своей важности для окружающей среды и климата (Watson et al., 2018; Funk et al., 2019; Jonsson et al., 2020; Браславская и др., 2020). Концепция биотической регуляции даёт этому пониманию теоретическое обоснование.

Учитывая долговременное присутствие человека на территории современной России и вносимые им возмущения, уточнение определения естественной “эталонной” экосистемы – т.е. наиболее устойчивой экосистемы с максимальным климаторегулирующим потенциалом – для каждого региона является серьёзной междисциплинарной научной проблемой. Например, какова должна быть степень сомкнутости лесного полога в эталонной экосистеме, чтобы обеспечить необходимые значения шероховатости поверхности, альbedo, потоки транспирации и накопление влаги в почве, оптимальные для поддержания устойчивого температурного режима и круговорота влаги? Этот

вопрос напрямую связан с вопросом о роли крупных животных в экосистеме и ограничениях на плотность их численности (Gorshkov, Makarieva, 2020; Nefiodov, 2020; Hatton, Galbraith, 2020; Sheil, 2020; Geraskina et al., 2020; Makarieva et al., 2020).

Ключевым является вопрос о минимальном размере площади земной поверхности, покрытой естественными экосистемами, которого было бы достаточно для выполнения работы по стабилизации окружающей среды и климата. Однако из уже имеющейся информации можно сделать вывод о том, что лесные экосистемы, сохраняющиеся на малонарушенных лесных территориях, критически необходимы для поддержания климатической устойчивости. Именно эти экосистемы должны стать ядром новой законодательной категории климато-регулирующих лесов. Сохраняющие устойчивость естественные леса, не попадающие в современное формальное определение малонарушенных лесных территорий, в частности, из-за своего недостаточно большого размера (менее 50 тыс. га), должны охраняться как "точки роста" для последующего расширения на большую площадь. Такие небольшие территории – зачастую единственные остающиеся эталоны устойчивых экосистем в центральных и южных регионах России, и потому они особенно важны.

Лесная политика России и международная климатическая повестка

Происходящие сегодня глобальные и региональные климатические изменения угрожают существованию и развитию как отдельных стран, так и цивилизации в целом. Перед лицом этой угрозы человечество пытается предпринять скоординированные усилия, которые всё сильнее определяют международную политическую повестку. В то же время осознание и признание многими людьми реальной климатической угрозы создают возможность недобросовестных политических спекуляций, отражающих конкурентную борьбу различных экономических групп, а не борьбу с изменениями климата. В этой ситуации

возрастает значение объективного научного знания как своеобразного "третьего судьи" в политических и геоэкономических спорах.

В сфере изменений климата защита национальных интересов Российской Федерации напрямую зависит от объективной научной оценки того экологического вклада, которую экосистемы, расположенные на территории нашей страны, вносят в стабилизацию глобального и регионального климата. Необходимо подчеркнуть, что научные представления в этой области сегодня **быстро меняются**. Вместе с ними, хотя и с запаздыванием на несколько лет, меняются и официальные рекомендации политикам от авторитетных международных научных организаций, включая МГЭИК. Сегодня в мировой климатической повестке можно различить тенденции намечающегося концептуального поворота «от углерода к воде». Хотя накопление углерода в лесных экосистемах по-прежнему рассматривается как основной аспект влияния леса на климат, звучат призывы изучать эту проблему более комплексно в гидрологическом и экологическом контексте (например, Sheil et al., 2019; Anderegg et al., 2020). Смена повестки приведёт к тому, что правила учёта влияния различных стран на климат изменятся, причём российские интересы будут затронуты в первую очередь. Необходимы **опережающие действия** по их защите.

На территории России находится одна пятая лесных экосистем планеты. До недавнего времени главным влиянием леса на климат считались эмиссия (при рубках, пожарах) или поглощение (при восстановлении леса) углекислого газа. Поглощение избыточного атмосферного углерода российскими лесами в значительной мере компенсирует выбросы углерода, связанные с добычей нефти, газа и угля российскими компаниями (Романовская, Федеричи, 2015). Однако сегодня, согласно последнему докладу МГЭИК (IPCC, 2019), для лесов высоких широт, включая российские, на первый план выходит их влияние на

отражательную способность планеты (Andrews et al., 2017; Winckler et al., 2019a,b). Утверждается, что нагрев поверхности планеты за счёт поглощения солнечной радиации лесным покровом в зимний период может превосходить охлаждение за счёт поглощения лесом избыточного углекислого газа. Если подобный расчёт будет, несмотря на значительные погрешности вплоть до смены знака, включён в официальные схемы оценки влияния различных стран на климат, – а такие попытки уже предпринимаются (см., например, Duveiller et al., 2020), – то российский углеродный след и связанные с ним экономические санкции существенно вырастут. Россия формально лишится своего климатического лесного буфера.

Возможность такого негативного сценария связана с тем, что, во-первых, естественные ненарушенные леса России недостаточно исследованы по сравнению с тропическими лесами Бразилии или Индонезии. Во-вторых, российские ненарушенные леса уникальны. Леса с давностью нарушения, превышающей несколько сотен лет, сохранились либо в самых старых заповедниках России, либо в труднодоступных местах, и не имеют мировых аналогов. Поэтому климатический вклад российских лесов оценивается на основании глобальных и региональных моделей, имеющих, по признанию самих специалистов МГЭИК, большую погрешность.

Убедительная демонстрация весомого вклада России в стабилизацию глобального и регионального климата невозможна без современных фундаментальных научных знаний о климато-регулирующей функции естественных российских лесов. Необходимо объединить усилия учёных различных областей, систематизировать уже имеющуюся информацию в рамках концепции биотической регуляции, провести пилотные исследования наиболее важных климатических характеристик ненарушенных лесов и использовать полученные результаты для формирования новой международной климатической повестки.

При условии сохранения ненарушенных лесов Россия является глобальным и региональным экологическим донором, обеспечивающим климатическую устойчивость. Заняв опережающую позицию, Россия может стать мировым экологическим лидером новой повестки, объединив вокруг себя страны, сохраняющие большие площади малонарушенных лесных территорий.

Заключение

Фундаментальная наука выявляет законы природы, которые составляют основу для согласованной объективной картины мира. Нарушение этих законов невозможно в том смысле, что такое нарушение несовместимо с жизнью. Все законы человеческого общества, регулирующие экономические, политические, социальные и культурные отношения, вторичны и должны формулироваться с учётом правильного понимания принципов функционирования биосферы и места человека в ней.

В условиях надвигающейся угрозы необратимого изменения глобального климата концепция биотической регуляции, отводящая определяющую роль естественным экосистемам в регуляции окружающей среды, накладывает принципиальные ограничения на деятельность современного человека. Удержать окружающую среду в устойчивом благоприятном для жизни состоянии может только естественная биота, которая тратит для этой цели практически всю свою мощь. Антропогенная эксплуатация, включая изъятие древесины, разрушает способность экосистем регулировать окружающую среду и климат.

Баланс между экосистемными функциями (в том числе между производством древесины и других древесных продуктов и осуществлением регуляции климата естественными лесными экосистемами) может быть достигнут только путём пространственного разграничения этих функций (*баланс через разграничение*).

Лесные экосистемы необходимо классифицировать по степени их

нарушенности. Лесное хозяйство в эксплуатационных лесах необходимо вести интенсивно, ограничив его теми территориями, которые уже освоены. Малонарушенные лесные территории, подвергнутые допороговым антропогенным возмущениям и способные к самовосстановлению в устойчивое состояние, должны быть законодательно (в частности, в рамках Лесного кодекса

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Aleinikov A.A. The fire history in pine forests of the plain area in the Pechora-Ilych Nature Biosphere Reserve (Russia) before 1942: possible anthropogenic causes and long-term effects // *Nature Conservation Research*. 2019. Vol. 4. Suppl. 1. P. 21-34.

URL: <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.033>

Alkama R., Cescatti A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover // *Science*. 2016. Vol. 351. Iss. 6273. P. 600-604.

URL: <https://doi.org/10.1126/science.aac8083>

Anderegg W.R.L., Trugman A.T., Badgley G., Anderson C.M., Bartuska A., Ciais P., Cullenward D., Field C.B., Freeman J., Goetz S. J., Hicke J.A., Huntzinger D., Jackson R.B., Nickerson J., Pacala S., Randerson J.T. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests // *Science*. 2020. Vol. 368. Iss. 6497. P. eaaz7005. URL: <https://doi.org/10.1126/science.aaz7005>

Andrews T., Betts R.A., Booth B.B.B., Jones C.D., Jones G.S. Effective radiative forcing from historical land use change // *Climate Dynamics*. 2017. Vol. 48. P. 3489-3505. URL: <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3280-7>

Belotelov N.V. Impact of the works of V.G. Gorshkov on the development of mathematical models of ecosystems // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2020. Vol. 5. Iss. 2. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-2-7>

Chapin F.S., Randerson J.T., McGuire A.D., Foley J.A., Field C.B. Changing feedbacks in the climate-biosphere system // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2008. Vol. 6. Iss. 6. P. 313-320. URL: <https://doi.org/10.1890/080005>

Российской Федерации) полностью выведены из хозяйственной деятельности и выделены в отдельную категорию с максимальной степенью юридической защиты, включая запрет на их перевод в категорию эксплуатационных лесов и в земли других категорий, и являться предметом широких междисциплинарных научных исследований.

Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I.I., Semenov V.A. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environmental Research Letters*. 2019. Vol. 14. Iss. 4. P. 045001. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82>

Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T. Tornadoes in Northern Eurasia: From the Middle Age to the Information Era // *Monthly Weather Review*. 2020. Vol. 148, Iss. 8. P. 3081-3110. URL: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0251.1>

Dean C., Kirkpatrick J.B., Friedland A.J. Conventional intensive logging promotes loss of organic carbon from the mineral soil // *Global Change Biology*. 2017. Vol. 23. Iss. 1. P. 1-11. URL: <https://doi.org/10.1111/gcb.13387>

Duveiller G., Caporaso L., Abad-Viñas R., Perugini L., Grassi G., Arneth A., Cescatti A. Local biophysical effects of land use and land cover change: towards an assessment tool for policy makers // *Land Use Policy*. 2020. Vol. 91. P. 104382. URL: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104382>

Emanuel K. The Relevance of Theory for Contemporary Research in Atmospheres, Oceans and Climate // *American Geophysical Union Advances*. 2020. Vol. 1. Iss. 2. P. e2019AV000129. URL: <https://doi.org/10.1029/2019AV000129>

Feurdean A., Florescu G., Tanțau I., Vannièrè B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Galka M., Kirpotin S. Recent fire regime in the southern boreal forests of western

- Siberia is unprecedented in the last five millennia // *Quaternary Science Reviews*. 2020. Vol. 244. P. 106495. URL: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106495>
- Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C., Bakker D.C.E., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Anthoni P., Barbero L., Bastos A., Bastrikov V., Becker M., Bopp L., Buitenhuis E., Chandra N., Chevallier F., Chini L.P., Currie K.I., Feely R.A., Gehlen M., Gilfillan D., Gkritzalis T., Goll D.S., Gruber N., Gutekunst S., Harris I., Haverd V., Houghton R.A., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Joetzjer E., Kaplan J.O., Kato E., Goldewijk K.K., Korsbakken J.I., Landschützer P., Lauvset S.K., Lefèvre N., Lenton A., Lienert S., Lombardozzi D., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Metzl N., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Neill C., Omar A.M., Ono T., Peregon A., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Séférian R., Schwinger J., Smith N., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F.N., van der Werf G.R., Wiltshire A.J., Zaehle S.* Global Carbon Budget 2019 // *Earth System Science Data*. 2019. Vol. 11. Iss. 4. P. 1783-1838. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
- Funk J.M., Aguilar-Amuchastegui N., Baldwin-Cantello W., Busch J., Chuvasov E., Evans T., Griffin B., Harris N., Ferreira M.N., Petersen K., Phillips O., Soares M.G., van der Hoff R.J.A.* Securing the climate benefits of stable forests // *Climate Policy*. 2019. Vol. 19. Iss. 7. P.845-860. URL: <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1598838>
- Furyaev V.V., Vaganov E.A., Tchebakova N.M., Valendik E.N.* Effects of fire and climate on successions and structural changes in the Siberian boreal forest // *Eurasian Journal of Forest Research*. 2001. Vol. 2. P. 1-15. URL: <http://hdl.handle.net/2115/22125>
- Geraskina A.P., Smirnova O.V., Korotkov V.N., Kudrevatykh I.Yu.* Productivity and content of macro- and microelements in the phytomass of ground vegetation of typical and unique taiga forests of the Northern Urals (example of spruce-fir forests of the Pechora-Ilych nature reserve) // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2020. Vol. 5. Iss. 2. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-2-1>
- Gorshkov V.G.* Atmospheric disturbance of the carbon cycle: Impact upon the biosphere // *IL Nuovo Cimento C*. 1986. Vol. 9. Iss. 5. P. 937-952. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02891905>
- Gorshkov V.G., Makarieva A.M.* Key ecological parameters of immotile versus locomotive life // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2020. Vol. 5. Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-1-1>
- Groisman P., Shugart H., Kicklighter D., Henebry G., Tchebakova N., Maksyutov S., Monier E., Gutman G., Gulev S., Qi J., Prishchepov A., Kukavskaya E., Porfiriev B., Shiklomanov A., Loboda T., Shiklomanov N., Nghiem S., Bergen K., Albrechtová J., Chen J., Shahgedanova M., Shvidenko A., Speranskaya N., Soja A., de Beurs K., Bulygina O., McCarty J., Zhuang Q., Zolina O.* Northern Eurasia Future Initiative (NEFI): facing the challenges and pathways of global change in the twenty-first century // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2017. Vol. 4. P. 41. URL: <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0154-5>
- Gross C.D., Harrison R.B.* The case for digging deeper: Soil organic carbon storage, dynamics, and controls in our changing world // *Soil Systems*. 2019. Vol. 3. Iss. 2. P. 28. URL: <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020028>
- Gu X., Zhang Q., Li J., Singh V. P., Liu J., Sun P., He C., Wu J.* Intensification and expansion of soil moisture drying in warm season over Eurasia under global warming // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2019. Vol. 124. Iss. 7. P. 3765-3782. URL: <https://doi.org/10.1029/2018JD029776>
- Hatton I., Galbraith E.* Commentary on “Key ecological parameters of immotile versus

- locomotive life" by V.G. Gorshkov and A.M. Makarieva // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2020. Vol. 5. Iss. 2. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-2-5>
- Heino M., Kummu M., Makkonen M., Mulligan M., Verburg P.H., Jalava M., Räsänen T.A. Forest Loss in Protected Areas and Intact Forest Landscapes: A Global Analysis // Public Library of Science One. 2015. Vol. 10. Iss. 10. P. e0138918. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138918>
- Hesslerová P., Huryňa H., Pokorný J., Procházka J. The effect of forest disturbance on landscape temperature // Ecological Engineering. 2018. Vol. 120. P. 345-354. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.06.011>
- Hubau W., Lewis S.L., Phillips O.L., Affum-Baffoe K., Beeckman H., Cuni-Sanchez A., Daniels A. K., Ewango C.E.N., Fauset S., Mukinzi J. M., Sheil D., Sonké B., Sullivan M.J.P., Sunderland T.C.H., Taedoumg H., Thomas S.C., White L.J.T., Abernethy K.A., Adu-Bredu S., Amani C.A., Baker T.R., Banin L.F., Baya F., Begne S.K., Bennett A.C., Benedet F., Bitariho R., Bocko Y.E., Boeckx P., Boundja P., Brienen R.J.W., Brncic T., Chezeaux E., Chuyong G.B., Clark C. J., Collins M., Comiskey J.A., Coomes D.A., Dargie G.C., de Haulleville T., Kamdem M.N.D., Doucet J.-L., Esquivel-Muelbert A., Feldpausch T.R., Fofanah A., Foli E.G., Gilpin M., Gloor E., Gonmadje C., Gourlet-Fleury S., Hall J.S., Hamilton A.C., Harris D.J., Hart T.B., Hockemba M.B.N., Hladik A., Ifo S.A., Jeffery K.J., Jucker T., Yakusu E.K., Kearsley E., Kenfack D., Koch A., Leal M.E., Levesley A., Lindsell J.A., Lisingo J., Lopez-Gonzalez G., Lovett J.C., Makana J.-R., Malhi Y., Marshall A.R., Martin J., Martin E.H., Mbayu F.M., Medjibe V.P., Mihindou V., Mitchard E.T.A., Moore S., Munishi P.K.T., Bengone N.N., Ojo L., Ondo F.E., Peh K.S.-H., Pickavance G.C., Poulsen A.D., Poulsen J.R., Qie L., Reitsma J., Rovero F., Swaine M.D., Talbot J., Taplin J., Taylor D.M., Thomas D.W., Toirambe B., Mukendi J.T., Tuagben D., Umunay P.M., van der Heijden G.M.F., Verbeeck H., Vleminckx J., Willcock S., Wöll H., Woods J.T., Zemagho L. Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests // Nature. 2020. Vol. 579. P. 80-87. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0>
- Huryňa H., Pokorný J. The role of water and vegetation in the distribution of solar energy and local climate: a review // Folia Geobotanica. 2016. Vol. 51. P. 191-208. URL: <https://doi.org/10.1007/s12224-016-9261-0>
- Iltstedt U., Bargués Tobella A., Bazié H.R., Bayala J., Verbeeten E., Nyberg G., Sanou J., Benegas L., Murdiyarsa D., Laudon H., Sheil D., Malmer A. Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. P. 21930. URL: <https://doi.org/10.1038/srep21930>
- IPCC, 2019: Jia G., Shevliakova E., Artaxo P., De Noblet-Ducoudré N., Houghton R., House J., Kitajima K., Lennard C., Popp A., Sirin A., Sukumar R., Verchot L. Chapter 2. Land-climate interactions. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems / Shukla P.R., Skea J., Calvo Buendia E., Masson-Delmotte V., Pörtner H.-O., Roberts D.C., Zhai P., Slade R., Connors S., van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Portugal Pereira J., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M., Malley J. (eds.). 2019. In press. URL: <https://www.ipcc.ch/srccl/cite-report/>
- Jonsson M., Bengtsson J., Moen J., Gamfeldt L., Snäll T. Stand age and climate influence forest ecosystem service delivery and multifunctionality // Environmental Research Letters. 2020. Vol. 15. Iss. 9. P. 0940a8. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaf1c>
- Khlebnikova E.I., Sall I.A. Peculiarities of climatic changes in cloud cover over the Russian Federation // Russian Meteorology and Hydrology. 2009. Vol. 34. P. 411-417.

- URL:<https://doi.org/10.3103/S1068373909070012>
- Kittler F., Heimann M., Kolle O., Zimov N., Zimov S., Göckede M. Long-term drainage reduces CO₂ uptake and CH₄ emissions in a Siberian permafrost ecosystem // *Global Biogeochemical Cycles*. 2017. Vol. 31. Iss. 12. P. 1704-1717. URL: <https://doi.org/10.1002/2017GB005774>
- Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Shvetsov E.G., Conard S.G., Kalenskaya O.P. The impact of increasing fire frequency on forest transformations in southern Siberia // *Forest Ecology and Management*. 2016. Vol. 382. P. 225-235. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.015>
- Kuznetsova A.I., Lukina N.V., Tikhonova E.V., Gornov A.V., Gornova M.V., Smirnov V.E., Geraskina A.P., Shevchenko N.E., Tebenkova D.N., Chumachenko S.I. Carbon stock in sandy and loamy soils of coniferous–broadleaved forests at different succession stages // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. Iss. 7. P. 756-768. URL: <https://doi.org/10.1134/S1064229319070081>
- Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Bakhmet O., Kryshen A., Tebenkova D., Shashkov M., Knyazeva S. Linking forest vegetation and soil carbon stock in Northwestern Russia // *Forests*. 2020. Vol. 11. Iss. 9. P. 979. URL: <https://doi.org/10.3390/f11090979>
- Luyssaert S., Schulze E.-D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P., Grace J. Old-growth forests as global carbon sinks // *Nature*. 2008. Vol. 455. P. 213-215. URL: <https://doi.org/10.1038/nature07276>
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M. Long-term Changes of River Water Inflow into the Seas of the Russian Arctic Sector // *Polarforschung*. 2018. Vol. 87. Iss. 2. P. 177-194. URL: <https://doi.org/10.2312/polarforschung.87.2.177>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2007. Vol. 11. P. 1013-1033. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1013-2007>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Li B.-L. Revisiting forest impact on atmospheric water vapor transport and precipitation // *Theoretical and Applied Climatology*. 2013. Vol. 111. P. 79-96. URL: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0643-9>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Sheil D., Nobre A.D., Bunyard P., Li B.-L. Why does air passage over forest yield more rain? Examining the coupling between rainfall, pressure, and atmospheric moisture content // *Journal of Hydrometeorology*. 2014. Vol. 15. Iss. 1. P. 411-426. URL: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0190.1>
- Makarieva A.M., Nefiodov A.V., Li B.-L. Life's Energy and Information: Contrasting Evolution of Volume- versus Surface-Specific Rates of Energy Consumption // *Entropy*. 2020. Vol. 22. Iss. 9. P. 1025. URL: <https://doi.org/10.3390/e22091025>
- Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Varlagin A., Yaseneva I., Olchev A. Energy and CO₂ exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the Southern Taiga // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019. Vol. 265. P. 252-268. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.018>
- Mayer M., Prescott C.E., Abaker W.E.A., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G.W.D., James J., Jandl R., Katzensteiner K., Laclau J.-P., Laganière J., Nouvellon Y., Paré D., Stanturf J.A., Vanguelova E.I., Vesterdal L. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis // *Forest Ecology and Management*. 2020. Vol. 466. P. 118127. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>
- Molinari C., Lehsten V., Blarquez O., Carcaillet C., Davis B.A.S., Kaplan J.O., Clear J., Bradshaw R.H.W. The climate, the fuel and the land use: Long-term regional variability of biomass burning in boreal forests // *Global Change Biology*.

2018. Vol. 24. Iss. 10. P. 4929-4945. URL: <https://doi.org/10.1111/gcb.14380>
- Nefiodov A.V.* Universal patterns of matter and energy fluxes in land and ocean ecosystems // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2020. Vol. 5. Iss. 2. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-2-6>
- Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J. G., Ciais P., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A.D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D.* A large and persistent carbon sink in the world's forests // *Science*. 2011. Vol. 333. Iss. 6045. P. 988-993. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Pöschl U., Martin S.T., Sinha B., Chen Q., Gunthe S.S., Huffman J.A., Borrmann S., Farmer D.K., Garland R.M., Helas G., Jimenez J.L., King S.M., Manzi A., Mikhailov E., Pauliquevis T., Petters M.D., Prenni A.J., Roldin P., Rose D., Schneider J., Su H., Zorn S.R., Artaxo P., Andreae M.O.* Rainforest Aerosols as Biogenic Nuclei of Clouds and Precipitation in the Amazon // *Science*. 2010. Vol. 329. Iss. 5998. P. 1513–1516. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1191056>
- Popkin G.* Weighing the world's trees // *Nature*. 2015. Vol. 523. Iss. 7558. P. 20-22. URL: <https://doi.org/10.1038/523020a>
- Potapov P., Hansen M.C., Laestadius L., Turubanova S., Yaroshenko A., Thies C., Smith W., Zhuravleva I., Komarova A., Minnemeyer S., Esipova E.* The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013 // *Scientific Advances*. 2017. Vol. 3. Iss. 1. P.e1600821. URL: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600821>
- Poveda G., Jaramillo L., Vallejo L.F.* Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers // *Water Resources Research*. 2014. Vol. 50. Iss. 1. P. 98-118. URL: <https://doi.org/10.1002/2013WR014087>
- Pradhan R., Singh N., Singh R.P.* Onset of summer monsoon in Northeast India is preceded by enhanced transpiration // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 18646. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55186-8>
- Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Kögel-Knabner I., Lehmann J., Manning D.A.C., Nannipieri P., Rasse D.P., Weiner S., Trumbore S.E.* Persistence of soil organic matter as an ecosystem property // *Nature*. 2011. Vol. 478. P. 49-56. URL: <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Sheil D.* Forests, atmospheric water and an uncertain future: the new biology of the global water cycle // *Forest Ecosystems*. 2018. Vol. 5. No. 19. P. 1-22. URL: <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0138-y>
- Sheil D., Bargués-Tobella A., Ilstedt U., Ibisch P.L., Makarieva A., McAlpine C., Morris C.E., Murdiyarsa D., Nobre A.D., Poveda G., Spracklen D.V., Sullivan C.A., Tuinenburg O.A., van der Ent R.J.* Forest restoration: Transformative trees // *Science*. 2019. Vol. 366. Iss. 6463. P. 316-317. URL: <https://doi.org/10.1126/science.aay7309>
- Sheil D.* Dangerous giants? – Large herbivores, forest feedbacks and climate tipping points // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2020. Vol. 5. Iss. 3. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-3-4>
- Sillitoe P.* Losing ground? Soil loss and erosion in the highlands of Papua New Guinea // *Land Degradation & Development*. 1993. Vol. 4. Iss. 3. P. 143-166. URL: <https://doi.org/10.1002/ldr.3400040305>
- Smith P., Soussana, J.-F., Angers D., Schipper L., Chenu C., Rasse D.P., Batjes N.H., van Egmond F., McNeill S., Kuhnert M., Arias-Navarro C., Olesen J.E., Chirinda N., Fornara D., Wollenberg E., Álvaro-Fuentes J., Sanz-Cobena A., Klumpp K.* How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal // *Global Change Biology*. 2020. Vol. 26. Iss. 1. P. 219-241. URL: <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>

- Turubanova S.A., Krylov A.M., Potapov P.V., Tyukavina A.Yu.* Forest dynamics in Eastern Europe (1985–2012) using Landsat data archive // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2017. Vol. 2. Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2017-1-3>
- Wardle D.A., Jonsson M., Bansal S., Bardgett R.D., Gundale M.J., Metcalfe D.B.* Linking vegetation change, carbon sequestration and biodiversity: insights from island ecosystems in a long-term natural experiment // Journal of Ecology. 2012. Vol. 100. Iss. 1. P. 16-30. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01907.x>
- Watson J.E.M., Evans T., Venter O., Williams B., Tulloch A., Stewart C., Thompson I., Ray J.C., Murray K., Salazar A., McAlpine C., Potapov P., Walston J., Robinson J.G., Painter M., Wilkie D., Filardi C., Laurance W.F., Houghton R.A., Maxwell S., Grantham H., Samper C., Wang S., Laestadius L., Runtting R.K., Silva-Chávez G.A., Ervin, J., Lindenmayer D.* The exceptional value of intact forest ecosystems // Nature Ecology & Evolution. 2018. Vol. 2. Iss. 4. P. 599-610. URL: <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0490-x>
- Winckler J., Lejeune Q., Reick C.H., Pongratz J.* Nonlocal effects dominate the global mean surface temperature response to the biogeophysical effects of deforestation // Geophysical Research Letters. 2019a. Vol. 46. Iss. 2. P. 745-755. URL: <https://doi.org/10.1029/2018GL080211>
- Winckler J., Reick C.H., Bright R.M., Pongratz J.* Importance of surface roughness for the local biogeophysical effects of deforestation // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2019b. Vol. 124. Iss. 15. P. 8605-8618. URL: <https://doi.org/10.1029/2018JD030127>
- Wright J.S., Fu R., Worden J.R., Chakraborty S., Clinton N.E., Risi C., Sun Y., Yin L.* Rainforest-initiated wet season onset over the Southern Amazon // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. Vol. 114. Iss. 32. P. 8481-8486. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1621516114>
- Zelinka M.D., Myers T.A., McCoy D.T., Po-Chedley S., Caldwell P.M., Ceppi P., Klein S.A., Taylor K.E.* Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47. Iss.1. P. e2019GL085782. URL: <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>
- Zhou G., Liu S., Li Z., Zhang D., Tang X., Zhou C., Yan J., Mo J.* Old-growth forests can accumulate carbon in soils // Science. 2006. Vol. 314. Iss. 5804. P. 1417. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1130168>
- Алейников А.А., Стенно С.П., Циберкин Н.Г., Мельничук А.Ф., Садовникова Е.Н.* Влияние пермских соляных промыслов XV–XIX вв. на трансформацию лесов: опыт оценки масштабов воздействия // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2018. Vol. 3. Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2018-1-2>
- Браславская Т.Ю., Колбовский Е.Ю., Есипова Е.С., Коротков В.Н., Немчинова А.В., Чуракова Е.Ю., Козыкин А.В., Кулясова А.А., Алейников А.А.* Ладшафтнo-бассейновый подход в экологической оценке малонарушенных лесов Онежского полуострова // Известия РАН. Серия географическая. 2020. Т. 84. № 6. С. 1-15.
- Гагарин Ю.Н.* Концепция проекта федерального закона «Лесной кодекс Российской Федерации» // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3. № 3. С. 1-45. URL: http://jfsi.ru/concept_of_the_forest_code_rf/
- Горшков В.Г.* Физические и биологические основы устойчивости жизни. Москва: ВИНТИ, 1995. 470 с. URL: https://www.bioticregulation.ru/pubs/pubs_5_r.php
- Горшков В.Г., Макарьева А.М.* Природа наблюдаемой устойчивости климата Земли // Геоэкология. 2006. № 3. С. 483-495.
- Замолодчиков Д.Г., Кобяков К.Н., Кокорин А.О., Алейников А.А., Шматков Н.М.* Лес и климат. Москва: Всемирный фонд дикой природы, 2015. 40 с.
- Макарьева А.М., Горшков В.Г.* "Окружающая природная среда потеряла устойчивость и стремительно

- разрушается..." // Энергия: Экономика, Техника, Экология. 2018. №5. С. 23-41.
- Паленова М.М. Общая характеристика видового и возрастного состава древостоев современных лесов / Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. Смирнова О.В. (ред.). Книга 1. Москва: Наука, 2004. С. 314-324. URL: <https://istina.msu.ru/publications/book/7873263/>
- Романовская А.А., Федеричи С. Квота на выбросы и роль лесного сектора в национальных обязательствах Российской Федерации в новом климатическом соглашении // СПб: Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2015. Вып. 1. С. 20-38. URL: <http://journal.spb-niilh.ru/pdf/1-2015/spbniilh-proceedings-1-2015-2.pdf>
- Смирнова О.В., Алейников А.А., Смирнов Н.С., Луговая Д.Л. Пионовая тайга // Природа. 2014. № 2. С. 54-63. URL: https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/434360/Pionovaya_tayga
- Цветков М.А. Изменение лесистости европейской России с конца XVII столетия по 1914 год. Москва: Академия наук СССР, 1957. 213 с.

REFERENCES

- Aleinikov A.A., The fire history in pine forests of the plain area in the Pechora-Ilych Nature Biosphere Reserve (Russia) before 1942: possible anthropogenic causes and long-term effects, *Nature Conservation Research*, 2019, Vol. 4, Suppl. 1, pp. 21-34. URL: <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.033>
- Aleynikov A.A., Stenno S.P., Tsiberkin N.G., Melnichuk A.F., Sadovnikova E.N., Vlijanie permskih soljanyh promyslov XV–XIX vv. na transformaciju lesov: opyt ocenki masshtabov vozdeystvija (Influence of the Perm salt production in the XV–XIX century for forest transformation: Impact assessment), *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2018, Vol. 3, Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2018-1-2>

- Alkama R., Cescatti A., Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover, *Science*, 2016, Vol. 351, Iss. 6273, pp. 600-604. URL: <https://doi.org/10.1126/science.aac8083>
- Anderegg W.R.L., Trugman A.T., Badgley G., Anderson C.M., Bartuska A., Ciais P., Cullenward D., Field C.B., Freeman J., Goetz S. J., Hicke J.A., Huntzinger D., Jackson R.B., Nickerson J., Pacala S., Randerson J.T., Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests, *Science*, 2020, Vol. 368, Iss. 6497, p. eaaz7005. URL: <https://doi.org/10.1126/science.aaz7005>
- Andrews T., Betts R.A., Booth B.B.B., Jones C.D., Jones G.S., Effective radiative forcing from historical land use change, *Climate Dynamics*, 2017, Vol. 48, pp. 3489-3505. URL: <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3280-7>
- Belotelov N.V., Impact of the works of V.G. Gorshkov on the development of mathematical models of ecosystems, *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2020, Vol. 5, Iss. 2. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-2-7>
- Braslavskaya T. Yu., Kolbowsky E. Yu., Esipova E. S., Korotkov V. N., Nemchinova A. V., Churakova E. Yu., Kozykin A. V., Kulyasova A. A., Aleinikov A. A., Ladshaftno-bassejnovyj podhod v jekologicheskoy ocenke malonarushennyh lesov Onezhskogo poluoostrova (The Landscape-Basin Approach for Ecological Evaluation of Intact Forest Areas on the Onega Peninsula (Russia)), *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2020, Vol. 84, No. 6, pp.1-15.
- Chapin F.S., Randerson J.T., McGuire A.D., Foley J.A., Field C.B., Changing feedbacks in the climate-biosphere system, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, Vol. 6, Iss. 6, pp. 313-320. URL: <https://doi.org/10.1890/080005>
- Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I.I., Semenov V.A., Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia

- over the last five decades, *Environmental Research Letters*, 2019, Vol. 14, Iss. 4, p. 045001. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82>
- Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T., Tornadoes in Northern Eurasia: From the Middle Age to the Information Era, *Monthly Weather Review*, 2020, Vol. 148, Iss. 8, pp. 3081-3110. URL: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0251.1>
- Dean C., Kirkpatrick J.B., Friedland A.J., Conventional intensive logging promotes loss of organic carbon from the mineral soil, *Global Change Biology*, 2017, Vol. 23, Iss. 1, pp. 1-11. URL: <https://doi.org/10.1111/gcb.13387>
- Duveiller G., Caporaso L., Abad-Viñas R., Perugini L., Grassi G., Arneth A., Cescatti A., Local biophysical effects of land use and land cover change: towards an assessment tool for policy makers, *Land Use Policy*, 2020, Vol. 91, p. 104382. URL: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104382>
- Emanuel K., The Relevance of Theory for Contemporary Research in Atmospheres, Oceans and Climate, *American Geophysical Union Advances*, 2020, Vol. 1, Iss. 2, p. e2019AV000129. URL: <https://doi.org/10.1029/2019AV000129>
- Feurdean A., Florescu G., Tanțău I., Vannièrè B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S.M., Gorina N., Gařka M., Kirpotin S., Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia, *Quaternary Science Reviews*, 2020, Vol. 244, p. 106495. URL: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106495>
- Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C., Bakker D.C.E., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Anthoni P., Barbero L., Bastos A., Bastrikov V., Becker M., Bopp L., Buitenhuis E., Chandra N., Chevallier F., Chini L.P., Currie K.I., Feely R.A., Gehlen M., Gilfillan D., Gkritzalis T., Goll D.S., Gruber N., Gutekunst S., Harris I., Haverd V., Houghton R.A., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Joetzjer E., Kaplan J.O., Kato E., Goldewijk K.K., Korsbakken J.I., Landschützer P., Lauvset S.K., Lefèvre N., Lenton A., Lienert S., Lombardozzi D., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Metzl N., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Neill C., Omar A.M., Ono T., Peregón A., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Séférian R., Schwinger J., Smith N., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F.N., van der Werf G.R., Wiltshire A.J., Zaehle S., Global Carbon Budget 2019, *Earth System Science Data*, 2019, Vol. 11, Iss. 4, pp. 1783-1838. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
- Funk J.M., Aguilar-Amuchastegui N., Baldwin-Cantello W., Busch J., Chuvashov E., Evans T., Griffin B., Harris N., Ferreira M.N., Petersen K., Phillips O., Soares M.G., van der Hoff R.J.A., Securing the climate benefits of stable forests, *Climate Policy*, 2019, Vol. 19, Iss. 7, pp. 845-860, URL: <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1598838>
- Furyaev V.V., Vaganov E.A., Tchebakova N.M., Valendik E.N., Effects of fire and climate on successions and structural changes in the Siberian boreal forest, *Eurasian Journal of Forest Research*, 2001, Vol. 2, pp. 1-15. URL: <http://hdl.handle.net/2115/22125>
- Gagarin Yu. N., Konceptcija proekta federal'nogo zakona «Lesnoi kodeks Rossiiskoi Federacii» (The concept of the draft federal law «Forest code of the Russian Federation»), *Forest Science Issues*, 2020, Vol. 3, No 3, pp. 1-45. URL: http://jfsi.ru/en/concept_of_the_forest_code_rf/
- Geraskina A.P., Smirnova O.V., Korotkov V.N., Kudrevatykh I.Yu., Productivity and content of macro- and microelements in the phytomass of ground vegetation of typical and unique taiga forests of the Northern Urals (example of spruce-fir forests of the Pechora-Ilych nature reserve), *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2020, Vol. 5, Iss. 2.

- URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-2-1>
- Gorshkov V.G., Atmospheric disturbance of the carbon cycle: Impact upon the biosphere, *IL Nuovo Cimento C*, 1986, Vol. 9, Iss. 5, pp. 937-952. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02891905>
- Gorshkov V.G., Makarieva A.M., Key ecological parameters of immotile versus locomotive life, *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2020, Vol. 5, Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-1-1>
- Gorshkov V.G., Makarieva A.M., Priroda nabljudajemoj ustojchivosti klimata Zemli (The nature of the observed climate stability on Earth), *Geoekologiya*, 2006, No. 3, pp. 483-495.
- Gorshkov V.G., *Physical and Biological Bases of Life Stability. Man. Biota. Environment*. Berlin: Springer, 1995, 340 p. DOI: 10.1007/978-3-642-85001-1
- Groisman P., Shugart H., Kicklighter D., Henebry G., Tchebakova N., Maksyutov S., Monier E., Gutman G., Gulev S., Qi J., Prishchepov A., Kukavskaya E., Porfiriev B., Shiklomanov A., Loboda T., Shiklomanov N., Nghiem S., Bergen K., Albrechtová J., Chen J., Shahgedanova M., Shvidenko A., Speranskaya N., Soja A., de Beurs K., Bulygina O., McCarty J., Zhuang Q., Zolina O., Northern Eurasia Future Initiative (NEFI): facing the challenges and pathways of global change in the twenty-first century, *Progress in Earth and Planetary Science*, 2017, Vol. 4, p. 41. URL: <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0154-5>
- Gross C.D., Harrison R.B., The case for digging deeper: Soil organic carbon storage, dynamics, and controls in our changing world, *Soil Systems*, 2019, Vol. 3, Iss. 2, p. 28. URL: <https://doi.org/10.3390/soilsystems3020028>
- Gu X., Zhang Q., Li J., Singh V. P., Liu J., Sun P., He C., Wu J., Intensification and expansion of soil moisture drying in warm season over Eurasia under global warming, *Journal of Geophysical Research*: *Atmospheres*, 2019. Vol. 124, Iss. 7, pp. 3765-3782. URL: <https://doi.org/10.1029/2018JD029776>
- Hatton I., Galbraith E., Commentary on "Key ecological parameters of immotile versus locomotive life" by V.G. Gorshkov and A.M. Makarieva, *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2020, Vol. 5, Iss. 2. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-2-5>
- Heino M., Kumm M., Makkonen M., Mulligan M., Verburg P.H., Jalava M., Räsänen T.A., Forest Loss in Protected Areas and Intact Forest Landscapes: A Global Analysis, *Public Library of Science One*, 2015, Vol. 10, Iss. 10, p. e0138918. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138918>
- Hesslerová P., Huryna H., Pokorný J., Procházka J., The effect of forest disturbance on landscape temperature, *Ecological Engineering*, 2018, Vol. 120, pp. 345-354. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.06.011>
- Hubau W., Lewis S.L., Phillips O.L., Affum-Baffoe K., Beeckman H., Cuní-Sánchez A., Daniels A. K., Ewango C.E.N., Fauset S., Mukinzi J. M., Sheil D., Sonké B., Sullivan M.J.P., Sunderland T.C.H., Taedoumg H., Thomas S.C., White L.J.T., Abernethy K.A., Adu-Bredu S., Amani C.A., Baker T.R., Banin L.F., Baya F., Begne S.K., Bennett A.C., Benedet F., Bitariho R., Bocko Y.E., Boeckx P., Boundja P., Brienen R.J.W., Brncic T., Chezeaux E., Chuyong G.B., Clark C. J., Collins M., Comiskey J.A., Coomes D.A., Dargie G.C., de Haulleville T., Kamdem M.N.D., Doucet J.-L., Esquivel-Muelbert A., Feldpausch T.R., Fofanah A., Foli E.G., Gilpin M., Gloor E., Gonmadje C., Gourlet-Fleury S., Hall J.S., Hamilton A.C., Harris D.J., Hart T.B., Hockemba M.B.N., Hladik A., Ifo S.A., Jeffery K.J., Jucker T., Yakusu E.K., Kearsley E., Kenfack D., Koch A., Leal M.E., Levesley A., Lindsell J.A., Lisingo J., Lopez-Gonzalez G., Lovett J.C., Makana J.-R., Malhi Y., Marshall A.R., Martin J., Martin E.H., Mbayu F.M., Medjibe V.P., Mihindou V., Mitchard E.T.A., Moore S.,

- Munishi P.K.T., Bengone N.N., Ojo L., Ondo F.E., Peh K.S.-H., Pickavance G.C., Poulsen A.D., Poulsen J.R., Qie L., Reitsma J., Rovero F., Swaine M.D., Talbot J., Taplin J., Taylor D.M., Thomas D.W., Toirambe B., Mukendi J.T., Tuagben D., Umunay P.M., van der Heijden G.M.F., Verbeeck H., Vleminckx J., Willcock S., Wöll H., Woods J.T., Zemagho L., Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests, *Nature*, 2020, Vol. 579, pp. 80-87.
URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0>
- Huryňa H., Pokorný J., The role of water and vegetation in the distribution of solar energy and local climate: a review, *Folia Geobotanica*, 2016, Vol. 51, pp. 191-208.
URL: <https://doi.org/10.1007/s12224-016-9261-0>
- Ilstedt U., Bargués Tobella A., Bazié H.R., Bayala J., Verbeeten E., Nyberg G., Sanou J., Benegas L., Murdiyarso D., Laudon H., Sheil D., Malmer A., Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics, *Scientific Reports*, 2016, Vol. 6, p. 21930. URL: <https://doi.org/10.1038/srep21930>
- IPCC, 2019: Jia G., Shevliakova E., Artaxo P., De Noblet-Ducoudré N., Houghton R., House J., Kitajima K., Lennard C., Popp A., Sirin A., Sukumar R., Verchot L., Chapter 2. Land-climate interactions, In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [Shukla P.R., Skea J., Calvo Buendia E., Masson-Delmotte V., Pörtner H.-O., Roberts D.C., Zhai P., Slade R., Connors S., van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Portugal Pereira J., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M., Malley J. (eds.)]. 2019. In press. URL: <https://www.ipcc.ch/srccl/cite-report/>
- Jonsson M., Bengtsson J., Moen J., Gamfeldt L., Snäll T., Stand age and climate influence forest ecosystem service delivery and multifunctionality, *Environmental Research Letters*, 2020, Vol. 15, Iss. 9, p. 0940a8.
URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaf1c>
- Khlebnikova E.I., Sall I.A., Peculiarities of climatic changes in cloud cover over the Russian Federation, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2009, Vol. 34, pp. 411-417. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068373909070012>
- Kittler F., Heimann M., Kolle O., Zimov N., Zimov S., Göckede M., Long-term drainage reduces CO₂ uptake and CH₄ emissions in a Siberian permafrost ecosystem, *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, Vol. 31, Iss. 12, pp. 1704-1717. URL: <https://doi.org/10.1002/2017GB005774>
- Kukavskaya E.A., Buryak L.V., Shvetsov E.G., Conard S.G., Kalenskaya O.P., The impact of increasing fire frequency on forest transformations in southern Siberia, *Forest Ecology and Management*, 2016, Vol. 382, pp. 225-235. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.015>
- Kuznetsova A.I., Lukina N.V., Tikhonova E.V., Gornov A.V., Gornova M.V., Smirnov V.E., Geraskina A.P., Shevchenko N.E., Tebenkova D.N., Chumachenko S.I., Carbon stock in sandy and loamy soils of coniferous-broadleaved forests at different succession stages, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, Iss. 7, pp. 756-768. URL: <https://doi.org/10.1134/S1064229319070081>
- Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Bakhmet O., Kryshen A., Tebenkova D., Shashkov M., Knyazeva S., Linking forest vegetation and soil carbon stock in Northwestern Russia, *Forests*, 2020, Vol. 11, Iss. 9, p. 979.
URL: <https://doi.org/10.3390/f11090979>
- Luyssaert S., Schulze E.-D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P., Grace J., Old-growth forests as global carbon sinks, *Nature*, 2008, Vol. 455, pp. 213-215.
URL: <https://doi.org/10.1038/nature07276>
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M., Long-term Changes of

- River Water Inflow into the Seas of the Russian Arctic Sector, *Polarforschung*, 2018, Vol. 87, Iss. 2, pp. 177-194. URL: <https://doi.org/10.2312/polarforschung.87.2.177>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., "Okruzhajushhaja prirodnaja sreda poterjala ustojchivost' i stremitel'no razrushaetsja..." ("The natural environment has lost stability and is rapidly degrading..."), *Energy: Economics, Technology, Ecology*, 2018, No. 5, pp. 23-41.
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, Vol. 11, pp. 1013-1033. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1013-2007>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Li B.-L., Revisiting forest impact on atmospheric water vapor transport and precipitation, *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, Vol. 111, pp. 79-96. URL: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0643-9>
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Sheil D., Nobre A.D., Bunyard P., Li B.-L., Why does air passage over forest yield more rain? Examining the coupling between rainfall, pressure, and atmospheric moisture content, *Journal of Hydrometeorology*, 2014, Vol. 15, Iss. 1, pp. 411-426. URL: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0190.1>
- Makarieva A.M., Nefiodov A.V., Li B.-L., Life's Energy and Information: Contrasting Evolution of Volume- versus Surface-Specific Rates of Energy Consumption, *Entropy*, 2020, Vol. 22, Iss. 9, p. 1025. URL: <https://doi.org/10.3390/e22091025>
- Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., Ivanov D., Kuricheva O., Varlagin A., Yaseneva I., Olchev A., Energy and CO₂ exchange in an undisturbed spruce forest and clear-cut in the Southern Taiga, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, Vol. 265, pp. 252-268. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.018>
- Mayer M., Prescott C.E., Abaker W.E.A., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G.W.D., James J., Jandl R., Katzensteiner K., Laclau J.-P., Laganière J., Nouvellon Y., Paré D., Stanturf J.A., Vanguelova E.I., Vesterdal L., Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis, *Forest Ecology and Management*, 2020, Vol. 466, p. 118127. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>
- Molinari C., Lehsten V., Blarquez O., Carcaillet C., Davis B.A.S., Kaplan J.O., Clear J., Bradshaw R.H.W., The climate, the fuel and the land use: Long-term regional variability of biomass burning in boreal forests, *Global Change Biology*, 2018, Vol. 24, Iss. 10, pp. 4929-4945. URL: <https://doi.org/10.1111/gcb.14380>
- Nefiodov A.V., Universal patterns of matter and energy fluxes in land and ocean ecosystems, *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2020, Vol. 5, Iss. 2. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-2-6>
- Palenova M.M., Obshhaja harakteristika vidovogo i vozrastnogo sostava drevostoev sovremennyh lesov, Vostochnoevropejskie lesa: istorija v golocene i sovremennost' (*General characteristics of the species and age composition of stands of modern forests, East European forests: History in the Holocene and the present*), Smirnova O.V. (red.). Book 1. Moscow: Nauka, 2004, pp. 314-324. URL: <https://istina.msu.ru/publications/book/7873263/>
- Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J. G., Ciais P., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A.D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D., A large and persistent carbon sink in the world's forests, *Science*, 2011, Vol. 333, Iss. 6045, pp. 988-993. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Popkin G., Weighing the world's trees, *Nature*, 2015, Vol. 523, Iss. 7558, pp. 20-22. URL: <https://doi.org/10.1038/523020a>
- Pöschl U., Martin S.T., Sinha B., Chen Q., Gunthe S.S., Huffman J.A., Borrmann S.,

- Farmer D.K., Garland R.M., Helas G., Jimenez J.L., King S.M., Manzi A., Mikhailov E., Pauliquevis T., Petters M.D., Prenni A.J., Roldin P., Rose D., Schneider J., Su H., Zorn S.R., Artaxo P., Andreae M.O., Rainforest Aerosols as Biogenic Nuclei of Clouds and Precipitation in the Amazon, *Science*, 2010, Vol. 329, Iss. 5998, pp. 1513-1516. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1191056>
- Potapov P., Hansen M.C., Laestadius L., Turubanova S., Yaroshenko A., Thies C., Smith W., Zhuravleva I., Komarova A., Minnemeyer S., Esipova E., The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013, *Scientific Advances*, 2017, Vol. 3, Iss. 1, p. e1600821. URL: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600821>
- Poveda G., Jaramillo L., Vallejo L.F., Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers, *Water Resources Research*, 2014, Vol. 50, Iss. 1, pp. 98-118. URL: <https://doi.org/10.1002/2013WR014087>
- Pradhan R., Singh N., Singh R.P., Onset of summer monsoon in Northeast India is preceded by enhanced transpiration, *Scientific Reports*, 2019, Vol. 9, p. 18646. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55186-8>
- Romanovskaya A.A., Federici S., Kvota na vybrosy i rol' lesnogo sektora v nacional'nyh objazatel'stvah Rossijskoj Federacii v novom klimaticheskom soglashenii (*Emission allowances and the role of the forest sector in the national obligations of the Russian Federation in the new climate agreement*) St.-Petersburg: Trudy Sankt Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo xozyajstva, 2015, Iss. 1, pp. 20-38. URL: <http://journal.spb-niilh.ru/pdf/1-2015/spbniilh-proceedings-1-2015-2.pdf>
- Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Kögel-Knabner I., Lehmann J., Manning D.A.C., Nannipieri P., Rasse D.P., Weiner S., Trumbore S.E., Persistence of soil organic matter as an ecosystem property, *Nature*, 2011, Vol. 478, pp. 49-56. URL: <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Sheil D., Bargués-Tobella A., Ilstedt U., Ibisch P.L., Makarieva A., McAlpine C., Morris C.E., Murdiyarso D., Nobre A.D., Poveda G., Spracklen D.V., Sullivan C.A., Tuinenburg O.A., van der Ent R.J., Forest restoration: Transformative trees, *Science*, 2019, Vol. 366, Iss. 6463, pp. 316-317. URL: <https://doi.org/10.1126/science.aay7309>
- Sheil D., Dangerous giants? – Large herbivores, forest feedbacks and climate tipping points, *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2020, Vol. 5, Iss. 3. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2020-3-4>
- Sheil D., Forests, atmospheric water and an uncertain future: the new biology of the global water cycle, *Forest Ecosystems*, 2018, Vol. 5, No. 19, pp.1-22. URL: <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0138-y>
- Sillitoe P., Losing ground? Soil loss and erosion in the highlands of Papua New Guinea, *Land Degradation & Development*, 1993, Vol. 4, Iss. 3, pp. 143-166. URL: <https://doi.org/10.1002/ldr.340040305>
- Smirnova O.V., Aleynikov A.A., Smirnov N.S., Lugovaya D.L., Pionovaja tajga (Peony taiga), *Priroda*, 2014, No. 2, pp. 54-63. URL: https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/434360/Pionovaya_tayga
- Smith P., Soussana, J.-F., Angers D., Schipper L., Chenu C., Rasse D.P., Batjes N.H., van Egmond F., McNeill S., Kuhnert M., Arias-Navarro C., Olesen J.E., Chirinda N., Fornara D., Wollenberg E., Álvaro-Fuentes J., Sanz-Cobena A., Klumpp K., How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal, *Global Change Biology*, 2020, Vol. 26, Iss., pp. 219-241. URL: <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>
- Tsvetkov M.A., Izmenenie lesnosti evropejskoj Rossii s konca XVII stoletija po 1914 god (*Change in forest cover in European Russia from the end of the 17th*

- century to 1914). M.: USSR Academy of Sciences, 1957, 213 p.
- Turubanova S.A., Krylov A.M., Potapov P.V., Tyukavina A.Yu., Forest dynamics in Eastern Europe (1985–2012) using Landsat data archive, *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2017, Vol. 2, Iss. 1. URL: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2017-1-3>
- Wardle D.A., Jonsson M., Bansal S., Bardgett R.D., Gundale M.J., Metcalfe D.B., Linking vegetation change, carbon sequestration and biodiversity: insights from island ecosystems in a long-term natural experiment, *Journal of Ecology*, 2012, Vol. 100, Iss. 1, pp. 16-30. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01907.x>
- Watson J.E.M., Evans T., Venter O., Williams B., Tulloch A., Stewart C., Thompson I., Ray J.C., Murray K., Salazar A., McAlpine C., Potapov P., Walston J., Robinson J.G., Painter M., Wilkie D., Filardi C., Laurance W.F., Houghton R.A., Maxwell S., Grantham H., Samper C., Wang S., Laestadius L., Runting R.K., Silva-Chávez G.A., Ervin, J., Lindenmayer D., The exceptional value of intact forest ecosystems, *Nature Ecology & Evolution*, 2018, Vol. 2, Iss. 4, pp. 599-610. URL: <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0490-x>
- Winckler J., Lejeune Q., Reick C.H., Pongratz J., Nonlocal effects dominate the global mean surface temperature response to the biogeophysical effects of deforestation, *Geophysical Research Letters*, 2019a, Vol. 46, Iss. 2, pp. 745-755. URL: <https://doi.org/10.1029/2018GL080211>
- Winckler J., Reick C.H., Bright R.M., Pongratz J., Importance of surface roughness for the local biogeophysical effects of deforestation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019b, Vol. 124, Iss. 15, pp. 8605-8618. URL: <https://doi.org/10.1029/2018JD030127>
- Wright J.S., Fu R., Worden J.R., Chakraborty S., Clinton N.E., Risi C., Sun Y., Yin L., Rainforest-initiated wet season onset over the Southern Amazon, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, Vol. 114, Iss. 32, pp. 8481-8486. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1621516114>
- Zamolodchikov D.G., Kobjakov K.N., Kokorin A.O., Aleynikov A.A., Shmatkov N.M., Les i klimat (*Forest and Climate*). M.: World Wide Fund for Nature, 2015, 40 p.
- Zelinka M.D., Myers T.A., McCoy D.T., Po-Chedley S., Caldwell P.M., Ceppi P., Klein S.A., Taylor K.E., Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models, *Geophysical Research Letters*, 2020, Vol. 47, Iss.1, p. e2019GL085782. URL: <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>
- Zhou G., Liu S., Li Z., Zhang D., Tang X., Zhou C., Yan J., Mo J., Old-growth forests can accumulate carbon in soils, *Science*, 2006, Vol. 314, Iss. 5804, pp. 1417. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1130168>

**SCIENCE IN THE VANGUARD OF RETHINKING THE ROLE OF FORESTS IN
THE THIRD MILLENNIUM: COMMENTS ON THE DRAFT CONCEPT
OF THE FEDERAL LAW "FOREST CODE OF THE RUSSIAN FEDERATION"**

A.M. Makarieva^{1*}, A.V. Nefiodov^{1*}, V.E. Morozov², A.A. Aleynikov³, R.G. Vasilov⁴

¹*B.P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute, Russia, 188300, Leningrad district,
Orlova Roscha, 1*

²*Public Council of Federal Forestry Agency, Russia, 115184 Moscow, ul. Pyatnitskaya, 59/19*

³*Center for Forest Ecology and Productivity, Russian Academy of Sciences
Russia, 117997 Moscow, ul. Profsoyuznaya, 84/32, bld. 14*

⁴*Yu.A. Ovchinnikov Russian Society of Biotechnologists
Russia, 119071 Moscow, Leninsky pr., 33, bld. 2*

*E-mail: ammakarieva@gmail.com; anef@thd.pnpi.spb.ru

Received: 01.10.2020

Accepted 19.10.2020

In this work, in the light of the latest scientific data, multiple aspects of the regulatory influence of forest ecosystems on climate are considered from the standpoint of the concept of biotic regulation of the environment: carbon absorption in the biomass of trees and soil, regulation of local temperature regime through the transpiration and reflectivity of forest cover, regulation of continental transport of atmospheric moisture and cloudiness. It is shown that under conditions of increasing climatic destabilization, the value of the climate-regulating function of forests and, in particular, its aspects associated with the water cycle, rapidly increases in comparison with the traditional economic functions of the forest. The Forest Code, as the main document regulating the impact of Russian citizens on the forest, should take into account the dynamically developing situation and assign a special role to climate-regulating forests. Considering that natural forest ecosystems have finite stability and climate-regulating potential, which commercially-scaled timber harvesting and other methods of exploitation can completely destroy, it is proposed to achieve a balance between the economic and climate-regulating functions of forests through their spatial delineation. Economic activity must be carried out intensively in previously developed territories where forests have been perturbed beyond their self-recovery threshold. Intact forests, performing a climate-regulating function, are proposed to be separated into a distinct legal category, subject only to protection and intensive study. It is shown that the advancement of the category of climate-regulating forests in the international climate agenda is vital for the protection of the national interests of Russia.

Key words: *biotic regulation of the environment, climate, carbon, water regime, clouds, biota, biogens, ecosystems, fire, climate-regulating forests, intact forest landscapes*