

## **Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России**

О.А. Анисимов, Е.Л. Жильцова, С.А. Ренева  
Государственный гидрологический институт

В 2010 году вышло пятое Национальное сообщение, которое представляет собой государственный доклад о различных аспектах экономической, политической, информационно-образовательной и иных видах деятельности, имеющих отношение к выбросам и абсорбции парниковых газов в атмосферу, позиционирующий Россию на международном уровне по этим проблемам [7]. В нем отмечается высокая уязвимость природных экосистем суши при климатических изменениях и формулируется необходимость разработки мер по адаптации к ним. В подтверждение этого многими авторами отмечается деградация многолетнемерзлых пород [1, 3, 8], смещение к северу границ растительных зон [15, 16] и сокращение площади арктической тундры [14]. Эти процессы имеют место уже сейчас и, согласно модельным расчетам с использованием климатических проекций, продолжатся с нарастающей интенсивностью в 21 веке [9, 10].

Закономерен вопрос о том, можно ли рассчитать критический уровень климатического воздействия, определяющий био- геосистемную, социально-экономическую и геополитическую устойчивость страны. Показательно, что в современной научной литературе крайне редко встречаются пригодные для этого количественные критерии, а в применении к природным экосистемам суши они отсутствуют полностью. Европейский Союз сформулировал свою позицию, согласно которой усилия будут направлены на то, чтобы не допустить увеличения глобально осредненной среднегодовой температуры воздуха более чем на 2°C по отношению к доиндустриальному периоду. За этим решением стоял анализ основных природных и социально экономических последствий изменений климата в различных странах ЕС, а также экономические и политические соображения баланса между потенциальным ущербом от потепления для ЕС и стоимостью мер по ограничению потепления на заданном уровне. В России же такая научно обоснованная позиция отсутствует. В данной работе предпринята попытка частично восполнить этот пробел применительно к природным процессам, т.е. развить аксиоматику на основе количественных

критериев, с позиций которой дать оценку современного и прогнозируемого в 21 веке воздействия изменения климата на территории России на экосистемы суши, определив критический уровень такого воздействия. Многие из предлагаемых общих принципов можно распространить на более широкий круг климатозависимых систем, в том числе и социально-экономических, однако эта выходит за рамки данной статьи.

В основу предлагаемой нами аксиоматики положено следующее.

- Критическим является уровень изменения климата, приводящий к существенным изменениям ключевых элементов природной среды.
- Существенными являются изменения гистерезисного типа, при которых траектории климатообусловленного развития элементов системы в прямом и обратном направлениях не совпадают.
- Ключевыми являются элементы природной среды, существенные изменения которых являются первопричиной каскадных изменений значительной части остальных элементов среды.

К ключевым элементам, несомненно, относятся и экосистемы суши. Увеличение продуктивности растительности при потеплении, если не сопровождается изменением видового состава, не является существенным изменением, поскольку оно полностью обратимо при возврате к фоновому климатическому режиму. Если же в результате воздействия меняются доминантные для данного региона виды растительности и возникает новый биом, его уровень следует считать критическим, поскольку из-за гистерезиса для возврата в прежнее состояние недостаточно вернуть климатические характеристики к их исходным значениям.

Понятие критического воздействия неотъемлемо связано с региональными климатозависимыми процессами, однако его можно распространить на любые географические масштабы, используя такой показатель, как степень охвата рассматриваемой территории существенными изменениями. В данной работе мы принимали за критический уровень, при котором они охватывали не менее одной трети территории России, хотя можно использовать и менее жесткий критерий, связав его с изменениями экосистем на половине территории. Независимо от степени охвата, критическим следует признать воздействие,

приводящие к уникальному результату, например, полному исчезновению тундры из-за смещения растительных зон и достижения границей леса Арктического побережья.

Для оценки критического уровня изменения климата нами была разработана эмпирико-статистическая модель растительности, рассматривающая отдельные биомы, под которыми понимается совокупность экосистем одной природно-климатической зоны. Согласно современным представлениям, биомы не будут перемещаться в своей целостности под воздействием меняющегося климата, а напротив, ожидается специфическая сукцессия растительности при сочетании как аборигенных, так и внедряющихся новых видов. Отсутствие достаточного количества наблюдений не позволило учесть такие процессы, поэтому мы моделировали лишь смещение ареалов биомов и не рассматривали возможные изменения соотношения между составляющими их функциональными типами растений.

Была составлена карта природных экосистем суши оптимального уровня детализации путем совмещения и генерализации двух цифровых карт из «Атласа земельных ресурсов России» [20] и карты растительности циркумполярного региона [12]. Обе были созданы на основе синтеза данных полевых наблюдений и спутниковой информации, отражающих современную биоклиматическую зональность. На первой из них хорошо представлены биомы бореальной зоны, включая альпийскую растительность. Недостатком этой карты, также как и многих современных динамических моделей растительности (см. например, [19]), является то, что вся территория к северу от границы леса представлена единственным классом тундры, в то время как там присутствуют различные биомы, подверженные в настоящее время сильным изменениям [21, 23]. Нами зона тундры была разделена на четыре подзоны: полярную пустыню; злаковую, кустарничковую и кустарниковую тундру, в соответствии с данными циркумполярной карты [12]. Затем была проведена генерализация избыточно детальных зон растительности в умеренном поясе с учетом ограничений, накладываемых обеспеченностью территории России метеорологическими данными.

Итоговая карта с разрешением  $0.5^\circ$  по широте и долготе включает следующие 15 зон (рис. 1а): полярную пустыню; граминоидную (злаковую), кустарничковую (стланики) и кустарниковую тундру; лесотундру, образованную сочетанием участков кустарничковой и кустарниковой тундры и березовых, лиственничных и еловых редколесий; северную, среднюю и южную тайгу, подтайгу (смешанный лес); в горных областях – альпийскую

тундру, субгольцевые редколесья и горную тайгу; степи. Зону северной тайги образуют в основном лиственничные, еловые и сосновые редколесья с мохово-лишайнико-кустарничковым покровом, зону средней тайги – леса тех же пород с мохово-лишайниковым и кустарничково-травяным покровом, зону южной тайги – елово-пихтово-кедровые и лиственнично-сосновые леса с травяно-кустарничковым покровом с участием кустарников. Субтайга (смешанные леса) представлена темнохвойными и лиственничными лесами с включением лиственных пород, березово-осиновыми лесами с включениями ели, лесами с доминированием липы (на западе Европейской части), сосновыми лесами, на юге переходящими в лесостепь.

В основу разработанной нами эмпирико-статистической модели положено представление о том, что зональность растительности определяется главным образом теплообеспеченностью в вегетационный период, суровостью зим и гидротермическим фактором, характеризующим соотношение увлажнения и испарения. В арктической области важную роль играет также наличие многолетнемерзлых грунтов и глубина сезонного оттаивания, определяющая мощность корнеобитаемого слоя. Для количественного описания этих факторов были использованы три климатические индекса, которые ранее применялись в работах для описания распространения лесных пород деревьев в Средней Сибири [4, 5]:

- сумма температур выше  $5^{\circ}\text{C}$  ( $\text{SumT}_{5+}$ ), характеризует температурный режим вегетационного периода,
- сумма температур ниже  $0^{\circ}\text{C}$  ( $\text{SumT}_{0-}$ ), характеризует суровость зим – важный лимитирующий фактор для растительности в условиях континентального климата),
- индекс сухости ( $D_r$ ), равный отношению суммы температур выше  $5^{\circ}\text{C}$  к годовому количеству осадков.

Заметим, что такая основополагающая характеристика многолетнемерзлых грунтов, как мощность сезонно-талого слоя неявно учтена в модели, поскольку она в первом приближении связана квадратичной зависимостью с суммой летних температур, и, таким образом, тесно коррелирует с первым из предикторов.

Построение эмпирико-статистической модели состояло в определении климатических пределов в пространстве трех индексов-предикторов, детерминирующих растительные зоны. Биоклиматические индексы, рассчитанные по метеоданным месячной

дискретности, были сопоставлены с цифровой картой современной растительности. Для выделенных на карте растительных зон определялись средние значения каждого из трех индексов,  $\bar{I}_i$ ,  $i=1,2,3$ , а также граничные значения 95% доверительного интервала ( $\bar{I}_i - 1.96\sigma_i$ ,  $\bar{I}_i + 1.96\sigma_i$ ), которые и принимались за климатические пределы ареала растительной зоны по данному индексу  $I_i$ . Для удобства сопоставления с цифровой картой растительности расчет индексов проводился с использованием метеорологического архива CRU-2, который получен путем интерполяции наблюдений мировой метеорологической сети в узлы регулярной сетки с разрешением  $0.5^\circ$  по широте и долготе. Ранее нами было показано, что этот архив воспроизводит поля температуры воздуха и осадков на территории стран бывшего СССР с небольшой погрешностью [6]. Отметим, что предпринятая попытка использовать для расчета индексов фактические данные метеостанций не привела к положительному результату, главным образом из-за того, что сеть наблюдений крайне неоднородная и редкая, в особенности в суб-арктической области. Из-за этого оказалось невозможным адекватно отразить все растительные зоны в пространстве климатических индексов. Более подробно влияние ограничений существующей сети метеонаблюдений на оценки изменений климата и их последствий рассмотрены в нашей предшествующей работе [2].

Формирование ареалов основных растительных зон на территории России происходило на протяжении значительного времени, поэтому как при ординации (определении климатических пределов), так и при восстановлении современных растительных зон в качестве фоновых были использованы данные за периоды различной продолжительности. Наилучшие результаты были получены при осреднении климатических данных за период 1901-1980, который и был взят в качестве фонового.

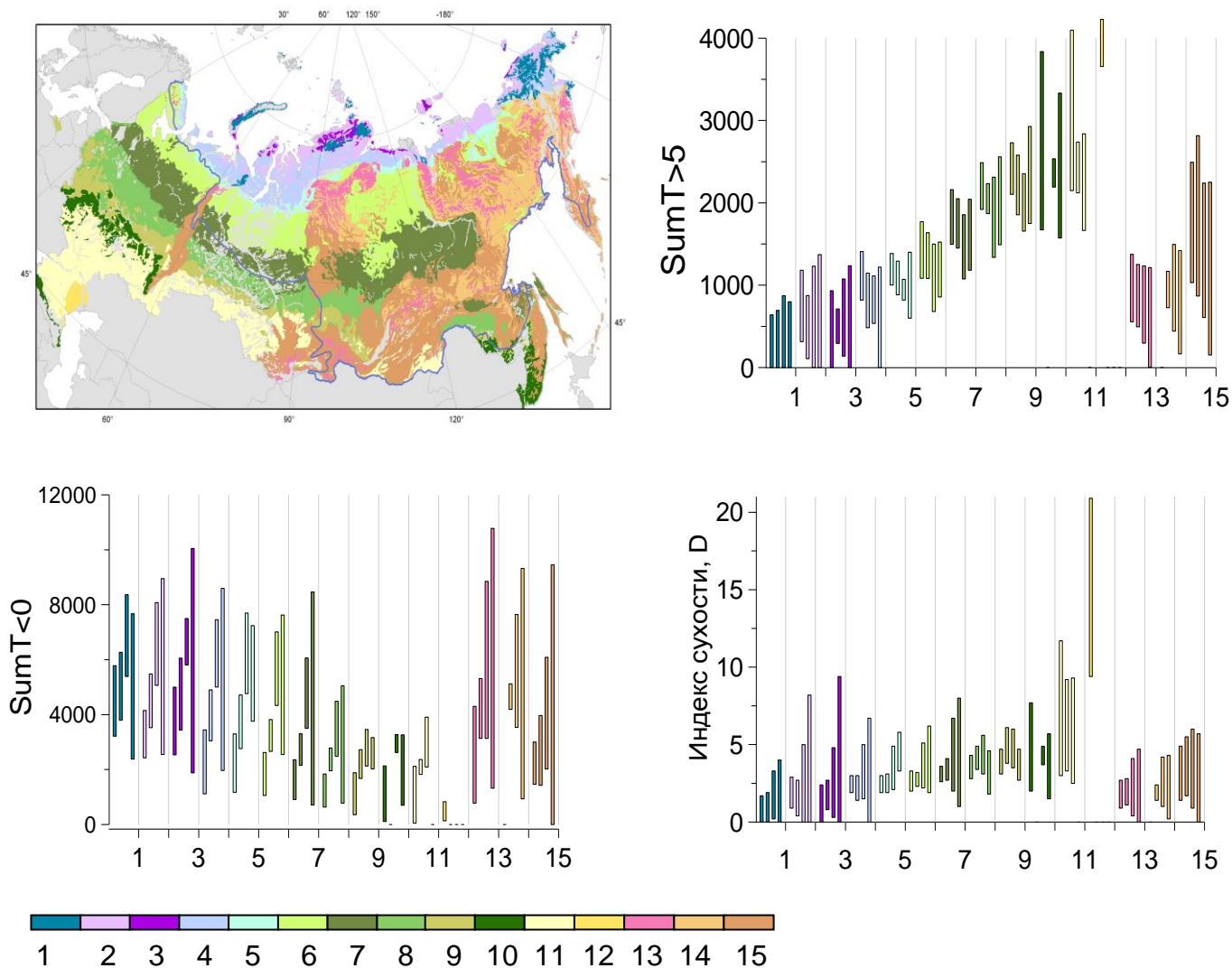


Рис. 1. Генерализованная карта современной растительности (а) и диапазоны значений индексов-предикторов в каждой из 15 растительных зон (б-г). Цифры по горизонтальным осям на рисунках (б-г) соответствуют обозначениям природных зон, указанных в легенде (1-бесплодные земли, 2-граминоидная тундра, 3-кустарничковая тундра, 4-кустарниковая тундра, 5-лесотундра, 6-северная тайга, 7-средняя тайга, 8-южная тайга, 9-смешанный лес, 10-широколиственный лес, 11-степи, 12-полупустыни, 13-альпийская тундра, 14-субгольцы, 15-горная тайга); вертикальные отрезки в пределах каждой зоны обозначают диапазон изменения биоклиматического индекса в выделенных четырех территориальных сегментах, т.е., слева направо: ЕТР; Западная, Восточная Сибирь и Дальний Восток.

Первоначально были определены единые климатические пределы каждой из растительных зон на всей территории России, при этом диапазоны индексов оказались слишком широкими и они сильно пересекались. Это выявило необходимость пространственной дифференциации модели, и вся территория была разделена на 4 сектора: европейскую часть (до 61°в.д.), Западную Сибирь (до 90°в.д.), Восточную Сибирь (до 130°в.д.) и Дальний Восток. Описанная выше процедура ординации растительных зон по индексам-предикторам была проведена отдельно по секторам. В результате диапазоны индексов-предикторов существенно уменьшились, однако проблему их множественного пересечения между зонами полностью устранить не удалось (см. рис. 1). Из диаграмм 1б-1г видно, что одному набору значений индексов-предикторов, как правило, соответствуют одновременно несколько растительных зон. В какой-то степени это закономерно, если принять во внимание биофизиологическую адаптацию растений к местным условиям, из-за которой климатические границы одних и тех же видов, произрастающих в разных регионах, могут значительно различаться. Такие примеры для древесной растительности описаны в работе [22]. С другой стороны, этот результат выявил ограниченность модели, в частности то, что используемые предикторы недостаточны для детального описания зональности и как максимум позволяют оценивать лишь климатообусловленную составляющую ее динамики. Эмпирическим путем, последовательно применяя различные способы воспроизведения современной растительной зональности и сравнивая результаты с картой на рисунке 1, был определен следующий оптимальный алгоритм.

Значения индексов рассчитываются для заданных климатических условий и интерполируются в сетку с шагом 0.5° по широте и долготе для сопоставимости окончательного результата моделирования с актуальной картой растительности, заданной в том же пространственном разрешении. Для узлов сетки составляется список возможных биомов на основе данных о соответствии диапазонов индексов растительным зонам с учетом особенностей четырех территориальных секторов (рис. 1б-1г). В случае неоднозначного выбора определяется наиболее вероятная для данной ячейки растительная зона, которая придает минимум функции  $f$  следующего вида:

$$f = \sum_{i=1}^3 \frac{(I_i - \bar{I}_i)^2}{\bar{I}_i^2} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Уравнение (1) отражает тот факт, что чем ближе к середине диапазона биоклиматического индекса  $\bar{I}_i$  для данной растительной зоны находится его значение  $I_i$  в конкретном узле сетки, тем более вероятно присутствие в нем данной зоны.

Была проведена проверка разработанной эмпирико-статистической модели. Для этого рассчитанные по данным архива CRU-2 за базовый период 1901-1980 значения трех биоклиматических индексов были проинтерполированы в сетку с шагом  $0.5^\circ$  по широте и долготе, после чего с использованием описанного выше алгоритма было воспроизведено современное распределение растительных зон (см. рис. 2). Общий характер распределения растительных зон, воссозданный моделью, хорошо соотносится с данными актуальной карты на рисунке 1, в том числе и в региональных деталях. Несомненно, имеются и различия, однако они не столь критичны, поскольку в контексте рассматриваемой задачи главным является не столько точность воспроизведения конкретного ареала отдельных растительных зон, сколько выявление тех областей, где при заданном уровне потепления предстоящие изменения климата и вечной мерзлоты вызовут замещение ныне существующей растительности новыми видами, с последствиями для всего природного комплекса. Отметим, что соответствие расчета актуальной карте, которая использовалась в модели для ординации растительных зон, нельзя считать проверкой на независимом материале. Вместе с тем, оно подтверждает, что выбор растительной зоны из множественных вариантов, осуществляемый минимизацией функции (1), обеспечивает достаточно высокую точность модели и ее можно использовать в прогностических целях.



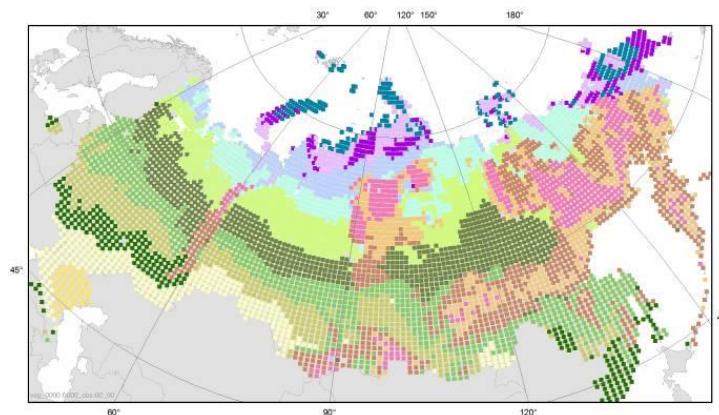


Рис.2. Воспроизведенные при помощи эмпирико-статистической модели растительные зоны на территории России на основе данных сеточного архива CRU-2 за период 1901-1980. Категории легенды те же, что и на рисунке 1.

Построенная модель была использована с ансамблевой климатической проекцией для 21 века, объединяющей результаты расчетов по 17 гидродинамическим моделям четвертого оценочного доклада МГЭИК для сценария эмиссий парниковых газов А2 [13]. Отметим, что сценарий эмиссий не существенен для решаемой задачи, поскольку он определяет главным образом скорость развития потепления (А2 – один из наиболее агрессивных), в то время как основной целью нашего анализа является уровень потепления, независимо от того, когда он будет достигнут.

Были проведены расчеты с использованием климатических данных, осредненных за 30-летние периоды 2001-2030, 2016-2045, 2031-2060 и 2066-2095 гг. Заметим, что традиционно используемый подход, основанный на оценке последствий потепления для условных климатических проекций на первую четверть, середину и конец 21 века, отчасти утрачивает свою актуальность в связи с формулировкой Европейским Союзом цели на ограничение глобального потепления на уровне  $+2^{\circ}\text{C}$  по отношению к доиндустриальному периоду. В случае реализации соответствующей политики климатические проекции необходимо будет скорректировать через сценарии выброса парниковых газов с тем, чтобы они также вышли на заданный уровень потепления. По используемой нами ансамблевой проекции со сценарием А2 этот уровень будет достигнут в период 2031-2060 гг., т.е. приблизительно к середине 21 века.

Ансамблевая климатическая проекция была задана в глобальной пространственной сетки с разрешением  $2.5^\circ$  по широте и долготе. Для того, чтобы минимизировать погрешности, связанные со смещением модельных оценок, были рассчитаны проектируемые приращения месячных величин температуры воздуха и осадков в среднем за каждый из выделенных периодов по отношению к среднему за период 1961-1990 гг., которые впоследствии накладывались на норму, рассчитанную в каждом узле более детальной сетки по данным архива CRU-2.

На картах слева на рис. 3 показаны прогнозы растительной зональности для двух периодов 2016-2045 и 2031-2060. На картах справа цветом выделены лишь те участки, где климатическое воздействие достигнет критического уровня, и интродукция новых биомов с соседних территорий приведет к существенным изменениям ныне существующей растительности. Эти карты хорошо иллюстрируют степень воздействия изменений климата на экосистемы, количественной мерой которого является отношение площади, охваченной существенными изменениями, ко всей территории России (таблица 1). Видно, что уже в первой четверти 21 века климатическое воздействие на экосистемы достигнет критического уровня на большей части бореальной зоны ЕТР и в Западной Сибири. К середине столетия в этих районах изменения могут полностью охватить огромное пространство от южных границ России до арктического побережья, область критического воздействия распространится практически на всю Восточную Сибирь и на значительную часть Якутии. Лишь на Дальнем Востоке и в Приморье сохранятся обширные территории с достаточно близким к современному распределению экосистем, многие из которых относятся к альпийской растительности.

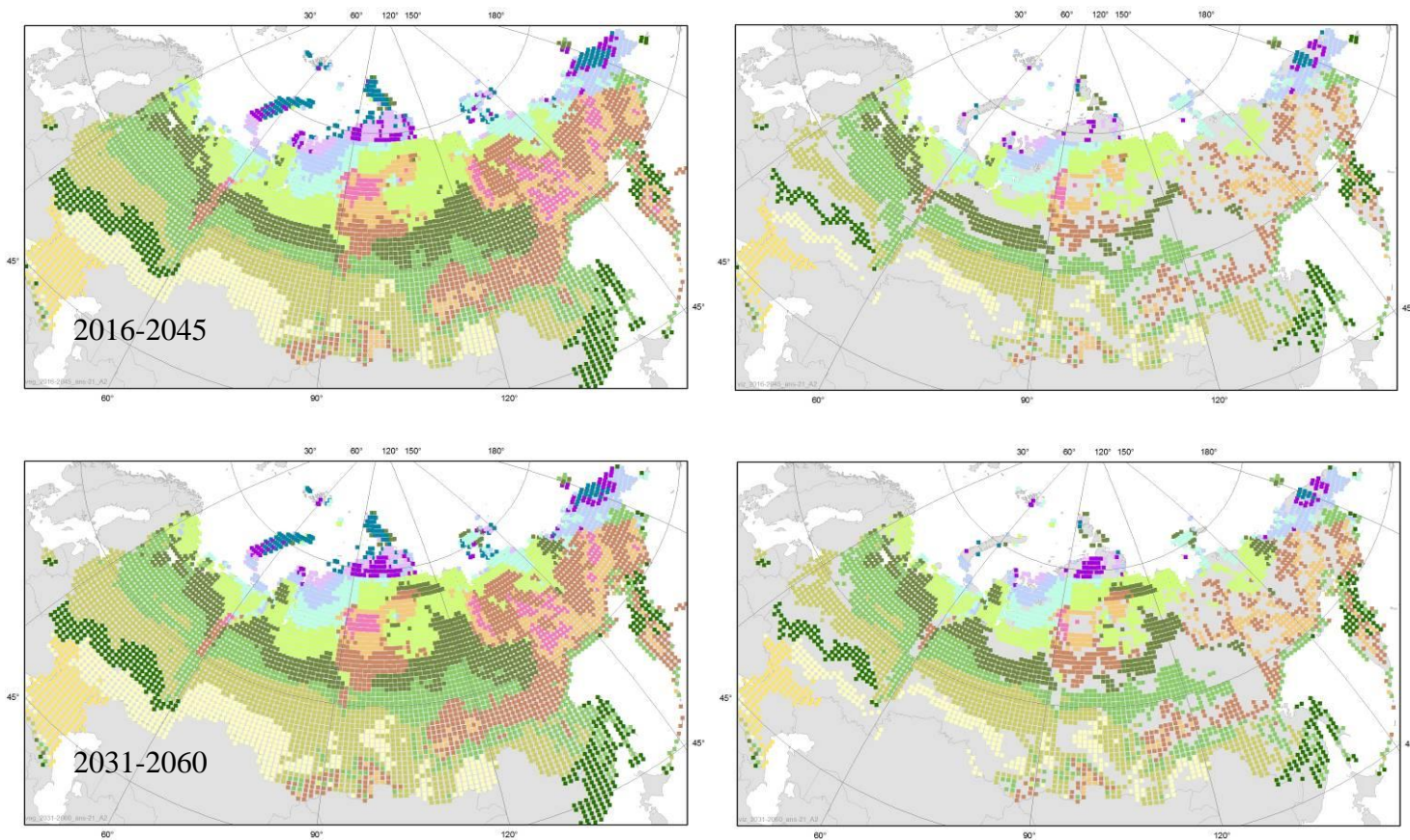


Рис. 3. Слева – прогноз растительной зональности на 2016-2045 и 2031-2060 гг. Справа - территории, попадающие к рассматриваемым периодам в область критического уровня воздействия, где прогнозируются изменения типа растительности по сравнению с современным периодом. Цвета (по легенде на рис. 1) соответствуют новым интродуцированным видам растительности, вытеснившим прежде существовавшие.

Таблица 1. Доля экосистем суши на территории России, подверженная критическому уровню воздействия.

Период	ЕТР	Зап. Сибирь	Вост. Сибирь	Д. Восток	РФ
2016-2045 гг.	58	64	55	48	56
2031-2060 гг.	71	74	70	57	67

Представляет интерес сопоставить полученные результаты с данными о климатообусловленной динамике растительных зон, которая наиболее ярко проявилась в субарктической области. Обзор таких наблюдений, проведенный в работе [18], позволяет сделать следующие выводы. Как наземные наблюдения, так и спутниковые данные подтверждают наличие тенденций, на которые указывают проведенные нами модельные расчеты. Показательны результаты экспериментов по длительному искусственному воздействию повышенной температуры воздуха, увеличению азотного питания и концентрации атмосферного углекислого газа на растительность, проводившиеся на протяжении нескольких лет более чем на десяти пробных площадках на Аляске, на севере Швеции (биостанция Абиско), в Сибири и на Чукотке. Везде отмечалось изменение видового состава арктических и субарктических биомов в направлении увеличения доли сосудистых транспирирующих растений и уменьшения доли низших несосудистых, представленных мохообразными и лишайниками. Схожие закономерности были выявлены и в естественных условиях. Так, по данным 156 постоянных мониторинговых площадок биостанции Toolik Lake на Аляске в период с 1981 по 2008 г. доля сосудистых растений увеличилась на 16%, а несосудистых – уменьшилась на 18%, при этом отмечено увеличение общей биомассы и высоты растительности [17]. Наибольшие изменения произошли в самых северных биомах, в особенности в канадской части Арктики, где в последние 25-30 лет было отмечено значительное сокращение зоны полярной пустыни (бесплодных земель), появление на них доминантных типов растений. Авторы [17] связывают это с увеличением температуры, которое происходило в этом регионе со скоростью около 0.6-1.0 °C/10 лет, причем в большей степени в зимний период, с удлинением и увеличением теплообеспеченности вегетационного периода, а также с увеличением мощности корнеобитаемого слоя за счет более глубокого сезонного оттаивания многолетнемерзлых пород.

Это подтверждают и спутниковые наблюдения, которые позволяют связать показатели растительности и теплообеспеченность. Основу составили данные по индексу фотосинтетической активности растительности, который представляет собой нормированную разность альбедо подстилающей поверхности в видимой и ближней инфракрасной области спектра. В англоязычной литературе этот индекс обозначается NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). В качестве показателя теплообеспеченности

рассматривались суммы положительных температур подстилающей поверхности, также оцениваемые по спутниковым данным через радиационную температуру. Теплообеспеченность за период 1982-2008 увеличилась в среднем по всей Арктике на 17%, в Американской ее части увеличение было больше (21%), чем в Евроазиатской (10%). Наибольшее увеличение теплообеспеченности произошло в сегментах, примыкающих к Чукотскому морю (50%), в западной (39%) и восточной (29%) Берингии, в восточной (35%) и западной (36%) частях Гренландии (35%) и на Земле Бофорта в Канаде (30%). Не было отмечено значимых трендов теплообеспеченности в районах, примыкающих к Карскому морю и морю Лаптевых.

Индекс NDVI в целом по всей Арктике увеличился на 7%, в Американской части больше (11%), чем в Евроазиатской (4%). Наибольшее увеличение имело место на западе Гренландии (20%), на Земле Бофорта (18%), на островах Канадского Арктического архипелага (14%) и в районе моря Бофорта (12%). Вместе с тем, в районах, примыкающих к Чукотскому морю, несмотря на наибольшее увеличение теплообеспеченности, индекс NDVI несколько уменьшился (-6%), как и в восточной части Берингии (-5%). В западной Берингии он не изменился. Авторы [11] отмечают, что на изменения растительности в прибрежной части суши оказало влияние сокращение площади морского льда.

Эти данные подтверждают принятую в работе концепцию, согласно которой растительность реагирует на увеличение теплообеспеченности лишь в том случае, если она является основным лимитирующим фактором. В таких районах имеет место высокая корреляция между теплообеспеченностью и NDVI, причем отклик биома в своей целостности может проявляться в увеличении биомассы и фотосинтетической активности, за счет чего и происходит увеличение индекса NDVI, при том, что видовой состав биомов сохраняется неизменным. В случае же, если теплообеспеченность находится вблизи границ допустимого для существующих биомов диапазона, происходят принципиально иные изменения, при которых биом теряет свою целостность, а отдельные составляющие его ФТР вступают в конкуренцию с привнесенными типами, ранее не встречавшимися на данной территории. В результате возникают новые биомы с существенно отличными свойствами, в том числе и оптическими (альбедо), что может вызвать, и, согласно приведенным данным наблюдений, вызывает противофазные изменения теплообеспеченности и NDVI.

В заключение можно поставить рассмотренную в статье модель и полученные с ее помощью результаты в контекст проблемы адаптации к климатическим изменениям. Основной целью адаптации является сохранение био-геосистемной и социально-экономической устойчивости, конкретные меры зависят от уязвимости природных систем, регионов и секторов экономики и от уровня климатического воздействия на них. Оценки соответствующих критических уровней целесообразно положить в основу разрабатываемой стратегии адаптации. Разработанные в проекте аксиоматика, критерии и методы позволяют рассчитать эти уровни, что позволит придать разрабатываемой стратегии упреждающий характер.

### **Благодарности**

Данная работа поддерживается РФФИ, проект 09-05-13544. Авторы признательны В.Ю. Разживину (Ботанический институт РАН) за многочисленные консультации и полезные замечания, касающиеся современного состояния и динамики растительности.

### **Список литературы**

1. Анисимов, О.А. ed. **Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования.** 2010, Гринпис: Москва. 44 р.
2. Анисимов, О.А. and Е.Л. Жильцова. **Об оценках изменений климата 20 и начала 21 веков по данным наблюдений на территории России.**- *Метеорология и гидрология*, 2012, № (в печати),
3. Аржанов, М.М., А.В. Елисеев, П.Ф. Демченко and И.И. Мохов. **Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа).**- *Криосфера Земли*, 2007, № 4, р. 65-69.
4. Чебакова, Н.М., Д. Рейфельдт and Е.И. Парфенова. **Перераспределение растительных зон и популяций лиственницы сибирской и сосны обыкновенной в Средней Сибири при потеплении климата.**- *Сибирский экологический журнал*, 2003, № 6, р. 677-686.
5. Чебакова, Н.М. and Е.И. Парфенова. **Прогноз продвижения границ леса при изменении климата к концу XX века в Средней Сибири.**- *Вычислительные технологии*, 2006, № 3, р. 77-86.

6. Жильцова, Е.Л. and О.А. Анисимов. **О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами.**- *Метеорология и гидрология*, 2009, № 10, p. 79-90.
7. Израэль, А., *et al.*, eds. **Пятое национальное сообщение Российской Федерации.** 2010, Росгидромет: Москва. 196 p.
8. Оберман, Н.Г. **Глобальное потепление и изменение криолитозоны Печоро-Уральского региона.**- *Разведка и охрана недр*, 2007, № 4, p. 63-68.
9. Оберман, Н.Г. and И.Г. Шеслер. **Прогнозирование деградации многолетнемерзлых пород (на примере Европейского Северо-Востока страны).**- *Разведка и охрана недр*, 2009, № 7, p. 20-30.
10. Павлов, А.В., Г.З. Перльштейн and Г.З. Типенко. **Актуальные аспекты моделирования и прогноза термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата.**- *Криосфера Земли*, 2010, № 1, p. 3-11.
11. Bhatt, U.S., D.A. Walker, M.K. Reynolds, J.C. Comiso, H.E. Epstein, G.J. Jia, R. Gens, J.E. Pinzon, C.J. Tucker, C.E. Tweedie and P.J. Webber. **Circumpolar Arctic tundra vegetation change is linked to sea-ice decline.**- *Earth Interactions*, 2010, № 14, p. doi: 10.1175/2010EI315.1.
12. **Circumpolar Arctic Vegetation Map. (1:7,500,000 scale).** 2003, CAVM Team. <http://www.geobotany.uaf.edu/cavm/>, <http://www.arcticatlas.org/maps/themes/cp/>
13. **CMIP3 Multi-Model Dataset Archive at PCMDI.** [http://www.pcmdi.llnl.gov/ipcc/about\\_ipcc.php](http://www.pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php)
14. Forbes, B.C., M.M. Fauria and P. Zetterberg. **Russian Arctic warming and "greening" are closely tracked by tundra shrub willows.**- *Global Change Biology*, 2010, № 16, p. 1542-1554.
15. Gonzalez, P., R.P. Neilson, J.M. Lenihan and R.J. Drapek. **Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change.**- *Global Ecology and Biogeography*, 2010, № 19, p. 755-768.
16. Hickling, R., D.B. Roy, J.K. Hill, R. Fox and C.D. Thomas. **The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards.**- *Global Change Biology*, 2006, № 12, p. 450-455.
17. Hudson, J.M.G. and G.H.R. Henry. **Increased plant biomass in a High Arctic heath community from 1981 to 2008.**- *Ecology*, 2009, № 90, p. 2657-2663.
18. Richter-Menge, J. and J.E. Overland. **Arctic Report Card 2010**, <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard>. 2010.
19. Sitch, S., B. Smith, I.C. Prentice, A. Arneth, A. Bondeau, W. Cramer, J.O. Kaplan, S. Levis, W. Lucht, M.T. Sykes, K. Thonicke and S. Venevsky. **Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model.**- *Global Change Biology*, 2003, № p. 161-185.
20. Stolbovoi, V. and I. McCallum. **CD-ROM Land Resources of Russia.** 2002, International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science: Laxenburg, Austria.
21. Tape, K., M. Sturm and C. Racine. **The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic.**- *Global Change Biology*, 2006, № 12, p. 686-702.

22. Tchebakova, N.M., G.E. Rehfeldt and E.I. Parfenova. **From vegetation zones to climatypes: effects of climate warming on Siberian ecosystems**, in *Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests, Ecological studies*, A. Osawa, et al., Editors. 2010, Springer Science+Business Media. p. 427-447.
23. Verbyla, D. **The greening and browning of Alaska based on 1982-2003 satellite data.**- *Global Ecology and Biogeography*, 2010, № 17, p. 547-555.

Таблица 1. Доли территории России и ее регионов, на которых прогнозируется достижение критического уровня климатического воздействия на экосистемы суши. Расчет для двух временных интервалов в первой половине 21 века по ансамблевой климатической проекции для сценария эмиссии парниковых газов А2.

Период	ЕТР	Зап. Сибирь	Вост. Сибирь	Д. Восток	РФ
2016-2045 гг.	58	64	55	48	56
2031-2060 гг.	71	74	70	57	67

#### Аннотация

Разработана аксиоматика и критерии для оценки критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши, основанные на выделении ключевых климатозависимых элементов среды и модельном анализе их изменений. Построена эмпирико-статистическая модель растительности для территории России, рассматривающая 15 растительных зон, в том числе 5 в криолитозоне. При помощи модельных расчетов получена оценка близости климатического воздействия на природные экосистемы суши к критическому уровню для нескольких климатических проекций.