

ЭМПИРИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Е.Л. Жильцова, О.А. Анисимов*

Россия, 199053 С-Петербург, 2-ая Линия В.О., 23, Государственный гидрологический институт, *EL-spb@mail.ru

Реферат. Цель работы состоит в том, чтобы оценить отклик растительности на ожидаемые изменения климата на территории России в XXI веке. Для этого создана эмпирико-статистическая модель, использующая биоклиматические индексы для расчета положения границ основных биомов при заданном климате. Калибровка модели была проведена с использованием данных о современном распределении растительных зон в России. Разработанная модель используется для оценки потенциальных изменений растительной зональности в XXI веке в условиях будущих климатов, описываемых моделями семейства CMIP3, для нескольких временных срезов в XXI веке. Некоторые из них соответствуют глобальному потеплению на 2°C по отношению к доиндустриальному уровню (непревышение этого уровня – «глобальная цель», принятая на 15-й Конференции сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата). В данной работе установлено, что в первой четверти XXI века на территории России равновесные границы биомов заметно изменятся при рассматриваемых будущих климатах.

Ключевые слова. Растительность, моделирование, изменение климата.

EMPIRICO-STATISTICAL MODELING OF VEGETATION ZONATION UNDER CLIMATE CHANGE IN RUSSIA

E.L. Ziltcova, O.A. Anisimov*

State Hydrological Institute, 23, Second Line V.O., 199053 St.Petersburg, Russia.
*EL-spb@mail.ru

Abstract. This study is targeted at the assessment of vegetation response in Russia to projected changes in climate in the 21st century. An empirical statistical model based on bioclimatic indices for the computation of main bioms' boundaries was developed to accomplish this goal. The model was calibrated using data on the contemporary distribution of the vegetation zones in Russia. The model was used for the assessment of potential changes in the vegetation zones' boundaries under future climates computing with the CMIP3 climatic models for several 21st century time slices. Some of them correspond to 2°C global warming above the preindustrial level (keeping the global temperature below this level is the actual global target adopted by the Fifteenth Conference of Parties of the UN Framework Convention on Climate Change). It is found in this paper that equilibrium boundaries of biomes in Russia will be noticeably changed in the first quarter of the 21st century under abovementioned climates.

Key words. Vegetation, modeling, climate change.

Введение

Вследствие продолжающегося последние несколько десятилетий глобального потепления климата исключительно важное значение приобрело изучение различных аспектов отклика на него природной среды. Для определения уровня воздействия изменений климата на ключевой элемент природной среды – растительность – нами была разработана эмпирико-статистическая модель, рассматривающая пространственное распределение биомов, под которыми понимается совокупность экосистем одной природно-климатической зоны. Конечной целью такого моделирования является отражение возможного смещения ареалов биомов в результате происходящих климатических изменений. В данной статье приводится описание калибровки и валидации модели на современных данных, а также обсуждаются результаты прогностических расчетов изменения границ растительных зон на территории России в условиях будущего климата первой четверти, середины и конца 21 века.

Эмпирико-статистическая модель климатообусловленной динамики биомов на территории России

Разработанная эмпирико-статистическая модель основывается на том, что распределение растительных биомов на поверхности

суши определяется, главным образом, тремя основными климатическими факторами: теплообеспеченностью в вегетационный период, континентальностью климата и режимом увлажнения. Существенное значение имеет также распределение почв. Они, в свою очередь, формируются под влиянием растительного покрова, но обладают, по сравнению с растительностью, гораздо большей инерционностью, а период их формирования столь длителен, что, говоря о современной динамике природной среды на протяжении нескольких десятилетий, этот фактор можно считать неизменным, если речь идет о естественных условиях. В субарктической области важную роль играет наличие многолетнемерзлых грунтов и глубина сезонного протаивания, определяющая мощность корнеобитаемого слоя. Для количественного описания этих факторов были выбраны три климатические индекса, которые ранее использовались в работах для описания распространения различных пород деревьев в лесах Средней Сибири (Чебакова и др., 2003; Чебакова, Парфенова, 2006):

- ✓ сумма температур выше 5°C ($\Sigma T > 5^{\circ}\text{C}$) – характеризует температурный режим вегетационного периода, а также неявно учитывает изменение мощности сезонно-талого слоя многолетнемерзлых грунтов в области криолитозоны (поскольку она, в первом приближении, связана квадратичной зависимостью с суммой летних температур);
- ✓ сумма температур ниже 0°C ($\Sigma T < 0^{\circ}\text{C}$) – характеризует суровость зим (важный лимитирующий фактор для растительности в условиях континентального климата);
- ✓ индекс увлажнения (D), равный отношению суммы температур выше 5°C к годовому количеству осадков.

Для отображения современного распределения биомов на территории России была составлена соответствующая карта – путем совмещения и генерализации двух цифровых карт: карты растительности из «Атласа земельных ресурсов России» (Stolbovoi, McCallum, 2002) и подробной карты растительности циркумполярного региона (Circumpolar Arctic Vegetation Map, 2003), поскольку именно в этой области, согласно многочисленным наблюдениям, происходят наиболее заметные изменения биомов. Обе исходные карты были созданы на основе синтеза данных полевых наблюдений и спутниковой информации и адекватно отражают современную биоклиматическую зональность.

Итоговая карта распределения биомов (рис. 1) разрешением 0,5° по широте и долготе включает следующие 15 биомов:

- 1) полярная пустыня;
- 2) граминоидная (злаковая) тундра;
- 3) кустарничковая тундра;
- 4) кустарниковая тундра;
- 5) лесотундра;
- 6) северная тайга;
- 7) средняя тайга;

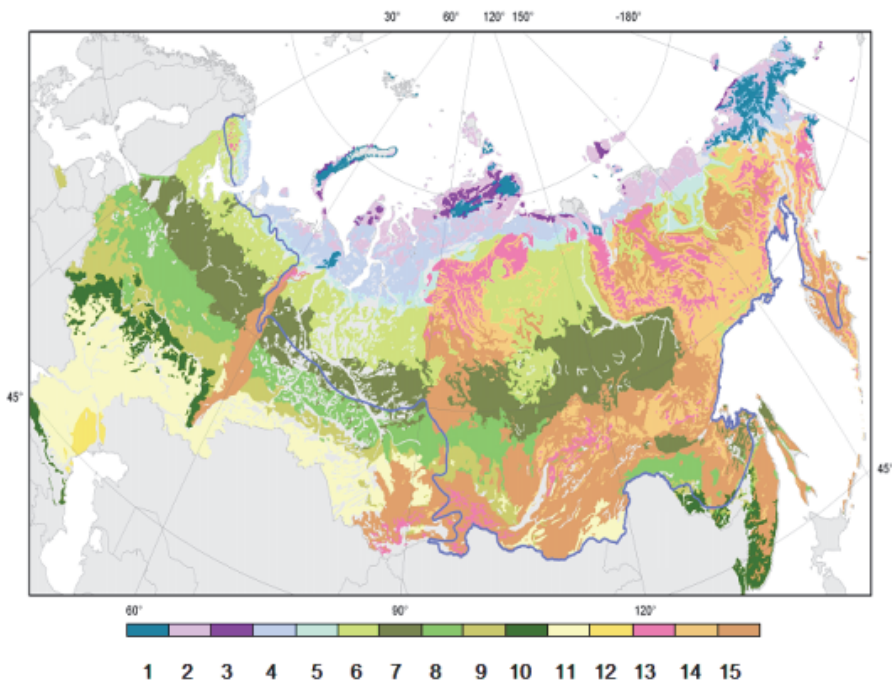


Рис. 1. Современная карта природных зон России:

1 – полярная пустыня; 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 – степь; 12 – полупустыня; 13 – альпийская тундра; 14 – субгольцевые редколесья; 15 – горная тайга. Синей линией показана граница области распространения многолетней мерзлоты.

- 8) южная тайга;
 - 9) подтайга (смешанный лес);
 - 10) широколиственные леса;
 - 11) степи;
 - 12) полупустыни;
- в горных областях:
- 13) альпийская тундра;
 - 14) субгольцевые редколесья;
 - 15) горная тайга.

Расчет современных значений биоклиматических индексов-предикторов проводился по данным метеорологического архива CRU-2 (Tyndall Centre for Climate Change Research, UK), представляющего собой результат интерполяции наблюдений мировой метеорологической сети в узлы регулярной сетки с разрешением $0,5^\circ$ по широте и долготе за период 1901-2002 гг. Ранее нами было показано, что для нескольких последних десятилетий этот архив воспроизводит поля температуры воздуха и осадков на территории стран бывшего СССР с относительно небольшой погрешностью (Жильцова, Анисимов, 2009).

Формирование ареалов основных растительных зон – длительный инерционный процесс, требующий в условиях стационарного климата не одного десятилетия, поэтому как для определения климатических границ, так и для восстановления современных ареалов растительных зон на территории России в качестве фонового был взят период 1901-1980 гг.

Воспроизведение моделью современных границ биомов на территории России

Вследствие огромной широтной протяженности территории России и большого разнообразия рельефа, принимая во внимание физиологическую адаптацию растений к местным условиям, из-за которой климатические границы одних и тех же видов, произрастающих в разных регионах, могут существенно различаться (Tshebakova et al., 2010), для более адекватного отражения распределения биомов ее территория была разделена на четыре сектора: европейскую часть (до 60° в.д.), Западную Сибирь (до 90° в.д.), Восточную Сибирь (до 130° в.д.) и Дальний Восток. Отладка модели проводилась для каждого из этих секторов в отдельности. В

таблицах 1-4 приведены полученные граничные значения биоклиматических индексов биомов для четырех рассмотренных секторов.

Таблица 1.

**Граничные значения биоклиматических индексов биомов на
Европейской части России**

| Биом | $\Sigma T > 5^{\circ}\text{C}$ | | $\Sigma T < 0^{\circ}\text{C}$ | | D | |
|------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|------|-------|
| | мин. | макс. | мин. | макс. | мин. | макс. |
| 1 | 0 | 700 | -5700 | -3200 | 0,0 | 1,7 |
| 2 | 200 | 1100 | -4200 | -2400 | 0,4 | 2,5 |
| 3 | 100 | 1200 | -4500 | -2500 | 0,2 | 2,4 |
| 4 | 500 | 1400 | -3400 | -1200 | 1,4 | 2,6 |
| 5 | 1000 | 1400 | -3300 | -1100 | 1,9 | 3,0 |
| 6 | 1200 | 1800 | -2600 | -1000 | 2,0 | 3,3 |
| 7 | 1500 | 2100 | -2400 | -900 | 2,6 | 3,6 |
| 8 | 1900 | 2500 | -1900 | -700 | 2,8 | 4,7 |
| 9 | 2200 | 2800 | -1800 | -400 | 3,1 | 5,1 |
| 10 | 2200 | 3800 | -1800 | -100 | 3,0 | 8,3 |
| 11 | 2700 | 4100 | -2100 | -100 | 3,0 | 11,7 |
| 12 | 3600 | 4300 | -800 | -100 | 9,4 | 20,9 |
| 13 | 600 | 1400 | -4000 | -1200 | 0,9 | 2,7 |
| 15 | 1100 | 2500 | -3000 | -1400 | 1,4 | 4,9 |

Таблица 2.

**Граничные значения биоклиматических индексов биомов в
Западносибирском регионе**

| Биом | $\Sigma T > 5^{\circ}\text{C}$ | | $\Sigma T < 0^{\circ}\text{C}$ | | D | |
|------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|------|-------|
| | мин. | макс. | мин. | макс. | мин. | макс. |
| 1 | 0 | 700 | -6500 | -3800 | 0,0 | 2,2 |
| 2 | 100 | 900 | -5900 | -3400 | 0,3 | 2,7 |
| 3 | 300 | 700 | -6600 | -3600 | 0,7 | 2,5 |
| 4 | 500 | 1200 | -5100 | -3000 | 1,4 | 3,0 |
| 5 | 900 | 1300 | -4700 | -2700 | 1,9 | 3,1 |
| 6 | 1100 | 1700 | -4200 | -2800 | 2,3 | 3,3 |
| 7 | 1500 | 2100 | -3300 | -2200 | 2,7 | 4,1 |
| 8 | 1900 | 2200 | -2800 | -1900 | 3,4 | 4,9 |
| 9 | 1800 | 2600 | -2700 | -1600 | 3,7 | 6,1 |
| 11 | 2100 | 3000 | -2500 | -1600 | 3,9 | 9,2 |
| 13 | 400 | 1100 | -6300 | -3000 | 0,8 | 2,7 |
| 14 | 600 | 1300 | -5700 | -4300 | 1,2 | 2,3 |
| 15 | 800 | 2600 | -4500 | -1400 | 1,6 | 5,4 |

Таблица 3.

**Граничные значения биоклиматических индексов биомов в
Восточносибирском регионе**

| Биом | $\Sigma T > 5^{\circ}\text{C}$ | | $\Sigma T < 0^{\circ}\text{C}$ | | D | |
|------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|------|-------|
| | мин. | макс. | мин. | макс. | мин. | макс. |
| 1 | 0 | 600 | -8400 | -5500 | 0,0 | 3,3 |
| 2 | 50 | 1200 | -8000 | -5100 | 0,2 | 4,4 |
| 3 | 100 | 1100 | -7500 | -5800 | 0,3 | 4,2 |
| 4 | 500 | 1200 | -7100 | -5000 | 1,5 | 5,0 |
| 5 | 800 | 1200 | -7700 | -4700 | 2,1 | 4,9 |
| 6 | 800 | 1500 | -7000 | -4300 | 2,2 | 5,1 |
| 7 | 1000 | 1900 | -6000 | -3500 | 2,3 | 5,7 |
| 8 | 1300 | 2300 | -4400 | -2400 | 3,1 | 5,7 |
| 9 | 1800 | 2500 | -3500 | -2100 | 3,5 | 6,0 |
| 10 | 2200 | 2600 | -3200 | -2000 | 3,7 | 4,9 |
| 11 | 1700 | 2700 | -4000 | -2200 | 3,8 | 10,3 |
| 13 | 300 | 1200 | -8800 | -3100 | 0,4 | 4,0 |
| 14 | 400 | 1500 | -7600 | -3500 | 1,0 | 4,2 |
| 15 | 600 | 2100 | -6100 | -2500 | 1,2 | 6,0 |

Таблица 4.

**Граничные значения биоклиматических индексов для биомов в
регионе Дальнего Востока**

| Биом | $\Sigma T > 5^{\circ}\text{C}$ | | $\Sigma T < 0^{\circ}\text{C}$ | | D | |
|------|--------------------------------|-------|--------------------------------|--------|------|-------|
| | мин. | макс. | мин. | макс. | мин. | макс. |
| 1 | 0 | 800 | -10000 | -3300 | 0,0 | 3,6 |
| 2 | 0 | 1000 | -8900 | -2500 | 0,0 | 8,2 |
| 3 | 0 | 1000 | -8900 | -3100 | 0,0 | 8,4 |
| 4 | 0 | 1200 | -8000 | -3000 | 1,2 | 7,3 |
| 5 | 700 | 1300 | -7300 | -4500 | 2,8 | 5,3 |
| 6 | 900 | 1500 | -8400 | -3000 | 1,9 | 6,2 |
| 7 | 1200 | 2000 | -8200 | -700 | 2,0 | 8,0 |
| 8 | 1500 | 2600 | -5000 | -800 | 3,3 | 6,1 |
| 9 | 1600 | 2900 | -3500 | -2000 | 3,9 | 5,9 |
| 10 | 1700 | 3300 | -3000 | -700 | 3,0 | 7,2 |
| 13 | 50 | 1200 | -10000 | -1300 | 0,0 | 4,4 |
| 14 | 150 | 1400 | -9300 | -932,5 | 0,2 | 4,3 |
| 15 | 250 | 2200 | -9400 | -700 | 0,4 | 5,7 |

Для проверки адекватности модели, рассчитанные по данным архива CRU-2 за базовый период 1901-1980 гг. значения биоклиматических индексов были проинтерполированы в сетку с шагом $0,5^\circ$ по широте и долготе, после чего было воспроизведено современное распределение растительных зон для каждого из четырех секторов (см. рис. 2-5).

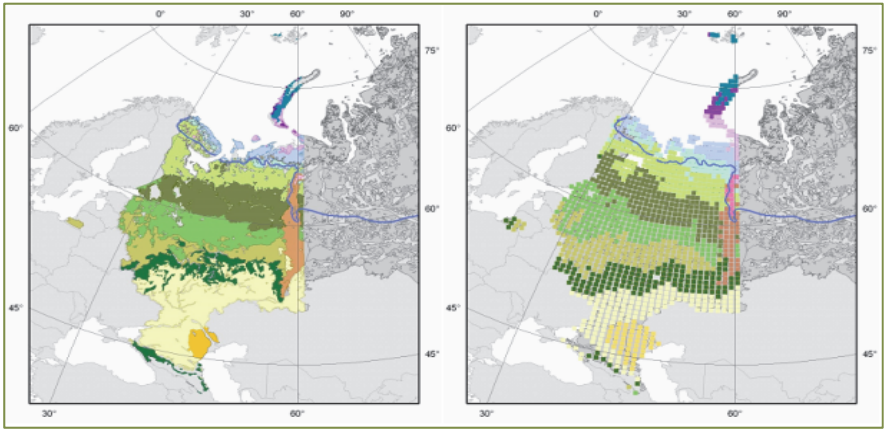


Рис. 2. Сравнение модельной реконструкции биомов с актуальной картой для Европейской части России.

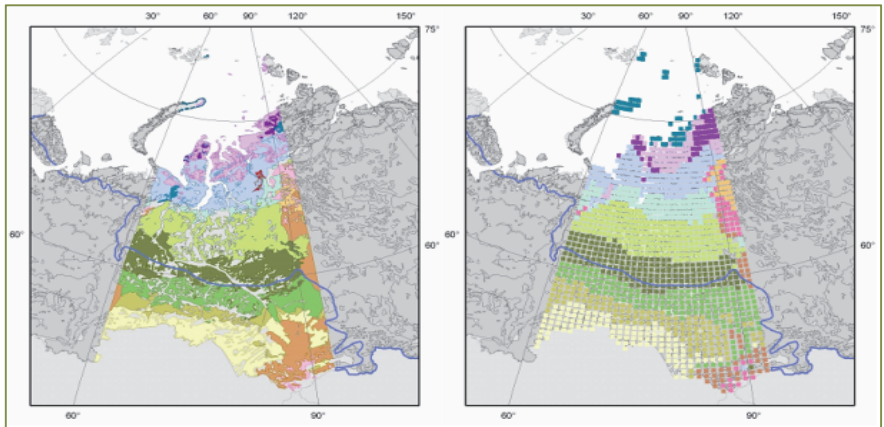


Рис. 3. Сравнение модельной реконструкции биомов с актуальной картой для Западной Сибири.

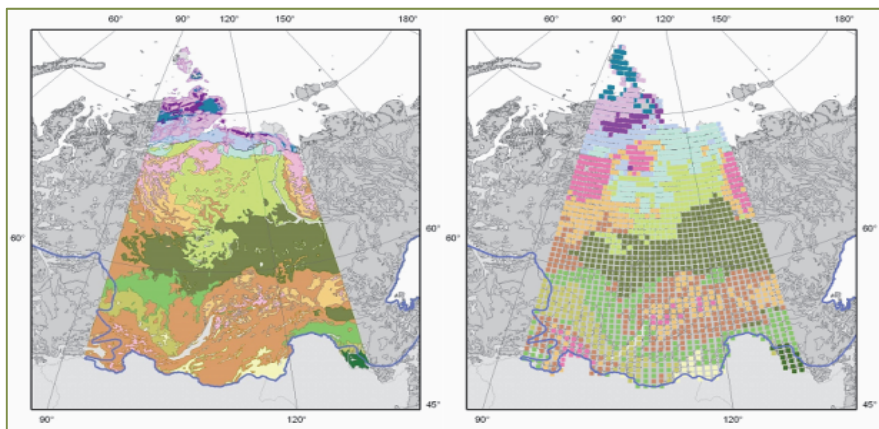


Рис. 4. Сравнение модельной реконструкции биомов с актуальной картой для Средней и Восточной Сибири.

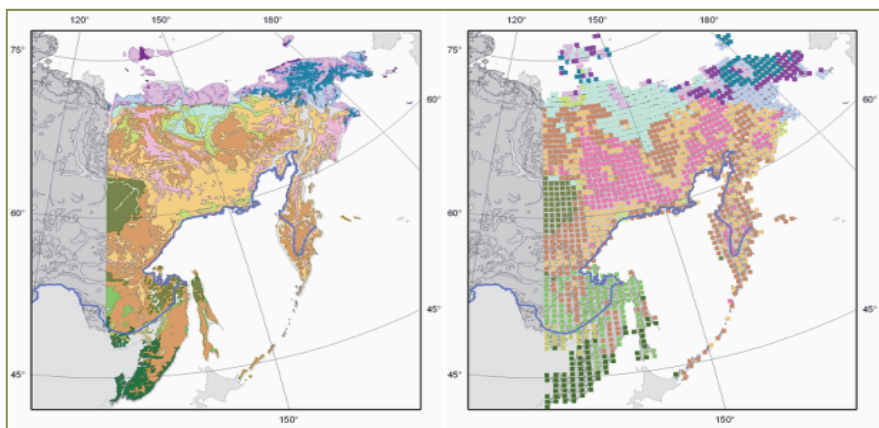


Рис. 5. Сравнение модельной реконструкции биомов с актуальной картой для Дальнего Востока.

Общий характер распределения растительных зон, воссозданный моделью, хорошо соотносится с актуальными данными, в том числе и в региональных деталях. Несомненно, имеются и различия, однако можно считать, что они не 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 могут привести к радикальному изменению ныне существующей растительности с последствиями для всего природного комплекса. Отметим, что соответствие расчета актуальной карте, которая использовалась в модели для определения климатических границ растительных зон, нельзя считать проверкой на независимом материале, однако оно подтверждает достаточно высокую точность модели и возможность ее использования в прогностических целях.

В качестве прогноза климата были использованы результаты расчетов по гидродинамическим моделям СМIP3 ([http://www-cmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php](http://www.cmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php)) для одного из наиболее жестких сценариев эмиссии парниковых газов А2. В нашем случае выбор сценария не имеет особого значения, поскольку им определяется в основном скорость потепления, тогда как для нашей задачи важен лишь его уровень. По расчетам 17 моделей СМIP3 была получена ансамблевая климатическая проекция с пространственным разрешением 2,5° по широте и долготе, по данным которой затем было проведено осреднение для четырех 30-летних периодов 21-го века: 2001-2030, 2016-2045, 2031-2060 и 2066-2095 гг. Следует отметить, что Европейским Союзом была поставлена стратегическая задача добиться ограничения глобального потепления на уровне +2°С по отношению к доиндустриальному периоду. В используемой нами ансамблевой проекции по сценарию А2 этот уровень будет достигнут в период 2031-2060 гг., и на него стоит обратить особое внимание.

Чтобы минимизировать погрешности, связанные со смещением модельных оценок, расчет прогнозируемых климатических характеристик проводился следующим образом: рассчитанные по модели средние отклонения месячных величин температуры воздуха и осадков за каждый из выбранных периодов по отношению к среднему за период 1961-1990гг. накладывались на норму, рассчитанную за этот же период по данным архива CRU-2.

На рисунке 6 представлены прогностические карты растительности для периодов 2016-2045 и 2031-2060 гг.

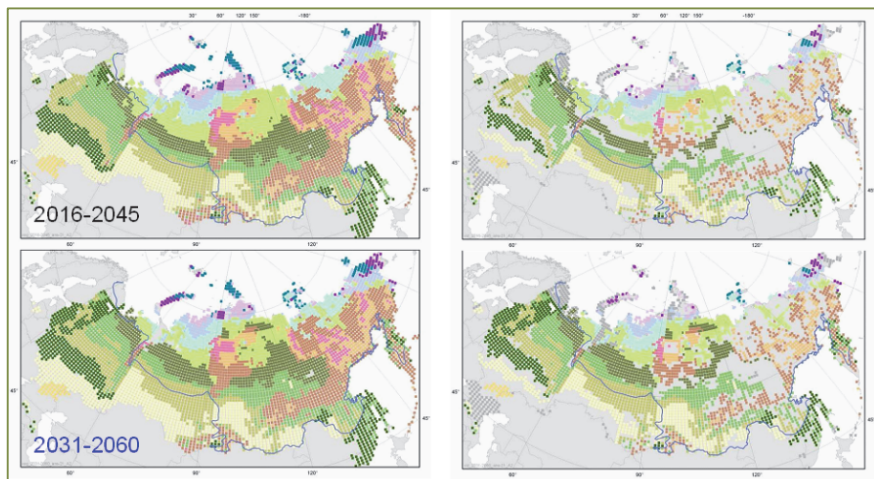


Рис. 6. Прогноз растительной зональности на 2016-2045 и 2031-2060 гг.
 Слева – общая картина, справа – прогнозируемые изменения.

На картах справа цветом выделены только те участки, где климатические изменения могут привести к смене растительной зоны. Иллюстрация наглядно показывает степень влияния изменения климата на экосистемы. Количественной оценкой такого влияния может служить отношение площади, где предполагаются изменения, к общей площади рассматриваемой территории (табл. 5).

Таблица 5.

Доля территории России (%), где прогнозируется изменение растительных зон

| Период | ЕТР | Западная Сибирь | Восточная Сибирь | Дальний Восток | Россия в целом |
|---------------|-----|-----------------|------------------|----------------|----------------|
| 2016-2045 гг. | 58 | 64 | 55 | 48 | 56 |
| 2031-2060 гг. | 71 | 74 | 70 | 57 | 67 |

Можно видеть, что уже в первой половине 21-го века изменение климата может привести к смене экосистем на большей части бореальной зоны Европейской территории России, в Западной и Восточной Сибири. К середине века изменения могут стать

тотальными. (Конечно, следует иметь в виду, что процесс формирования и смены экосистем обладает значительной инерционностью, и отклик природной среды на климатические изменения не может быть мгновенным.)

Дискуссия

Интересно сопоставить полученные результаты с данными наблюдений за происходящими в настоящее время изменениями растительности, особенно в субарктическом поясе, где они проявляются наиболее наглядно. Обзор, представленный в работе (Richter-Menge, Overland, 2010), свидетельствует о том, что и наземные наблюдения, и спутниковый мониторинг подтверждают наличие выявленных модельными расчетами тенденций. Так, эксперимент по изучению искусственного воздействия на арктическую растительность повышенной температуры воздуха, увеличенной концентрации углекислого газа и усиленного азотного питания, проводившийся в течение нескольких лет на экспериментальных площадках Аляски, Чукотки, Сибири и Северной Швеции, продемонстрировал характерное для таких условий изменение соотношения растительных видов – увеличение доли сосудистых растений и сокращение доли мхов и лишайников.

Аналогичные изменения происходят и в естественной среде. Почти тридцатилетние наблюдения (1981-2008 гг.) на биостанции Toolik Lake на Аляске показали увеличение доли сосудистых растений на 18%, а также рост высоты растений и увеличение общей биомассы (Hudson, Henry, 2009). При этом наиболее существенные изменения наблюдаются в самых северных биомах. Особенно ярко они проявились в канадской части Арктики, где за последние тридцать лет, на фоне интенсивного повышения температуры воздуха (около 0,6 – 1,0 °C / 10 лет), произошло значительное сокращение зоны полярной пустыни (Hudson, Henry, 2009). На севере Европейской части России (Кольский полуостров) за последние десятилетия, по данным спутниковых наблюдений, также зафиксированы смещение к северу границы тундры и лесотундры, продвижение лесотундровой растительности вверх по склонам, замещение лишайниковой и кустарничково-лишайниковой тундры лишайниково-кустарничковой и кустарничковой, зарастание болот древесно-кустарниковой растительностью (Кравцов, Лошкарева, 2010).

Получивший широкое распространение спутниковый мониторинг индекса фотосинтетической активности растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) позволяет связать изменение продуктивности растительности с изменением теплообеспеченности, также оцениваемым по спутниковым данным о радиационной температуре. Наблюдения показали, что за период 1982-2008 гг. в целом по Арктике теплообеспеченность увеличилась на 21%, а индекс NDVI вырос на 7% (Bhatt et al., 2010).

Все эти материалы подтверждают положенную в основу работы концепцию, в соответствии с которой растительность должна положительно реагировать на увеличение теплообеспеченности, только если теплообеспеченность является одним из основных лимитирующих факторов, то есть в высоких и средних широтах, где и наблюдается значительная корреляция между теплообеспеченностью и NDVI. При этом до какого-то момента отклик может проявляться в увеличении биомассы и фотосинтетической активности растительности при сохранении неизменного видового состава. Когда же уровень теплообеспеченности приближается к границам допустимого для существующего на данной территории биома диапазона, результатом становятся кардинальные изменения – биом теряет стабильность, изменяется соотношение между отдельными видами растений, некоторые виды вытесняются, происходит инвазия новых видов из соседних биомов, в итоге образуются новые растительные сообщества, обладающие новыми свойствами (это может привести, в частности, к изменению альбедо и отразиться в противонаправленном теплообеспеченности изменении NDVI). Закономерным следствием этого процесса, обусловленного монотонным повышением глобальной температуры в течение последних десятилетий и прогнозируемым продолжающимся ее повышением на протяжении всего 21-го века, является изменение ареалов растительных зон с общим смещением их границ к северу (в северном полушарии), сокращение и дальнейшее исчезновение зоны тундры, а также изменение высотной поясности. Такая радикальная трансформация неизбежно должна привести к изменению всей природной среды, поскольку растительность является одним из определяющих, ключевых ее элементов, а уровень потепления, приводящий к таким последствиям, можно назвать критическим (Анисимов и др., 2011).

В заключение можно сказать, что предложенная эмпирико-статистическая модель растительности может быть полезна в свете решения задачи адаптации природной среды и общества к происходящим изменениям климата, основной целью которой является сохранение биogeосистемной, социально-экономической, этнокультурной стабильности. Для России, практически вся территория которой расположена в высоких и средних широтах и большую ее часть занимает область многолетней мерзлоты, проблема адаптации к климатическим изменениям является особенно актуальной.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 13-05-00072 и 13-05-91171-ГФЕН_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Ренева С.А. 2011. Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России. *Метеорология и гидрология*. №11. С. 31-41.
2. Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. 2009. О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами. *Метеорология и гидрология*. № 10. С. 79-90.
3. Кравцова В.И., Лошкарева А.Р. 2010. Исследование северной границы леса по космическим снимкам разного разрешения. *Вестник МГУ. Сер. Геогр.* №6. С. 49-57.
4. Чебакова Н.М., Парфенова Е.И. 2006. Прогноз продвижения границ леса при изменении климата к концу XX века в Средней Сибири. *Вычислительные технологии*. №3. С. 77-86.
5. Чебакова Н.М., Рейфельдт Д.Е., Парфенова Е.И. 2003. Перераспределение растительных зон и популяций лиственницы сибирской и сосны обыкновенной в Средней Сибири при потеплении климата. *Сибирский экологический журнал*. № 6. С. 677-686.
6. Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Comiso J.C., Epstein H.E., Jia G.J., Gens R., Pinzon J.E., Tucker C.J., Tweedie C.E., Webber P.J. 2010. Circumpolar Arctic tundra vegetation change is linked to sea-ice decline. *Earth Interactions*. V. 14. Paper №8. 19 P. doi: 10.1175/2010EI315.1.
7. Circumpolar Arctic Vegetation Map. 2003. CAVM Team. <http://www.geobotany.uaf.edu/cavm/>, <http://www.arcticatlas.org/maps/themes/cp/>.
8. Hudson J.M.G., Henry G.H.R. 2009. Increased plant biomass in a High Arctic heath community from 1981 to 2008. *Ecology*. №90. P. 2657-2663.
9. Richter-Menge J., Overland J.E. 2010. Arctic Report Card. <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard>.

10. Stolbovoi V., McCallum I. 2002. CD-ROM Land Resources of Russia. International Institute for Applied Systems Analysis and the Russian Academy of Science: Laxenburg, Austria.
11. Tchebakova N.M., Rehfeldt G.E., Parfenova E.I. 2010. From vegetation zones to climatypes: effects of climate warming on Siberian ecosystems, in Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests, Ecological studies. A. Osawa et al., Eds. Springer Science+Business Media. P. 427-447.