

Прогноз возможных изменений зональных границ растительности Европейской России и Западной Сибири в связи с глобальным потеплением

В. Ю. РУМЯНЦЕВ, С. М. МАЛХАЗОВА, Н. Б. ЛЕОНОВА, М. С. СОЛДАТОВ

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
географический факультет, кафедра биогеографии
119991, Москва, Ленинские горы-1
E-mail: vyurim@biogeo.ru*

АННОТАЦИЯ

Обсуждаются связи зональных границ растительности с некоторыми климатическими показателями. Прогнозируются возможные изменения границ подзон растительности на территории Европейской России и Западной Сибири в рамках одного из сценариев глобального потепления. Выявленные закономерности позволяют предложить математико-картографическую модель зональности растительности на период 2046–2065 гг.

Ключевые слова: зональность растительности, глобальное потепление, климатические показатели, прогноз, математико-картографическая модель.

В современной научной литературе при анализе проблемы влияния глобального потепления на растительность внимание уделяется как выявлению климатических показателей, оказывающих значимое влияние на растительные сообщества, так и исследованию реакции растительности на изменение значений этих показателей, в том числе изменениям зональных границ растительности.

Смещение зональных границ растительности наиболее вероятно там, где условия экстремальны и лимитирующим фактором является температура воздуха [1]. Поэтому наиболее заметные изменения границ древесной растительности могут наблюдаться на северном пределе ее распространения. Согласно различным прогнозным моделям, при глобальном потеплении ожидается продвижение к северу границы леса в высоких широтах [1–3]. Современными исследованиями в полярных областях Сибири отмечено распростра-

нение древесной растительности на север. Так, в самых северных в мире лесных массивах в районе Хатанги в течение последних 30 лет выявлены возрастание сомкнутости лиственничников на 65 % и продвижение их в тундру на 3–20 м/год [4], а в Красноярском крае – экспансия вечнозеленых хвойных (кедр, ель, пихта) на север и вытеснение ими лиственницы [5]. В Европейской России прогнозируют расселение на север широколиственных пород [1, 2].

Неоднократно предпринимавшиеся попытки установления связей между зональными границами растительности и разнообразными климатическими показателями обычно сталкивались с рядом проблем, среди которых, по-видимому, в первую очередь нужно назвать следующие [3]:

– сложность этих связей из-за неоднозначности реакции растительности на изменения климата: зональные границы обуслов-

лены не только климатом, но и инерционностью растительности как системы;

– многофакторность климатических воздействий, выражающаяся многочисленностью климатических показателей, значимых для растительности;

– недостаток кондиционных данных о пространственном распределении климатических показателей;

– недостаточная определенность самого понятия “зональные границы”: на разных схемах зональности растительности положение границ конкретных зон и подзон может различаться.

В работе предпринята попытка построения математико-картографической модели связей зональности растительности с некоторыми климатическими показателями. На основе этой модели предлагается прогноз возможных изменений границ подзон растительности в связи с глобальным потеплением.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Информация о пространственном распределении климатических показателей, положенная в основу обсуждаемой модели, характеризует европейскую территорию России (ЕТР) и Западную Сибирь (ЗСб). Территория разбита градусной сеткой на ячейки размером 2×2 градуса.

Данные за период с 1961 по 1989 г. включительно (так называемый “период современного климата”) представляют собой результаты ре-анализа NСАР/NCER [6–9] конкретных измерений сети метеостанций, интерполированные на узлы (геометрические центры ячеек – *центроиды*) градусной сетки. Для каждого узла рассчитаны значения ряда климатических показателей. Допущено, что их значения для узла (точки) можно экстраполировать на всю ячейку (полигон).

Прогнозные данные на 2046–2065 гг. основаны на результатах анализа ряда математических моделей общей циркуляции атмосферы и океана, разработанных в рамках проекта СМIP3 (*Coupled Model Intercomparison Project*) Всемирной программы исследования климата WCRP (*World Climate Research Programme*). Принят сценарий “А2” IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) –

один из наиболее “жестких”, но не обещающий очень больших изменений [7–9].

Из всего многообразия климатических показателей для проведения анализа выбраны следующие:

1) активные температуры воздуха ($T > 10 \text{ }^\circ\text{C}$). Рассмотрены: число дней в году с активными температурами и годовая сумма таких температур. Эти показатели считаются основными климатическими характеристиками продолжительности вегетационного периода растений;

2) гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова (Селянинов, 1930, по: [10])

$$\text{ГТК} = \text{SumR}/0,1 \times \text{SumT}, \quad (1)$$

где *SumR* – сумма осадков за год; *SumT* – сумма активных температур за год.

Возможные изменения зональных границ растительности оценивались на основе карты “Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий” [11]. Эта карта отображает наиболее распространенные представления о современной зональности растительности, при этом максимально соответствуя поставленной задаче в плане масштаба и детальности. Принято как допущение, что ситуация на карте отражает равновесие зональных границ растительности и условий “периода современного климата”.

В пределах ЕТР и ЗСб представлены следующие категории классификации равнинной растительности (зоны и подзоны, согласно легенде карты на рис. 1):

А. Тундровая зона. Подзоны: А2 – арктических тундр; А3 – северных гипоарктических (типичных) тундр; А4 – южных гипоарктических (кустарниковых) тундр.

В. Таежная зона. Подзоны: В1 – лесотундры; В2 – северной тайги; В3 – средней тайги; В4 – южной тайги; В5 – подтайги (смешанных лесов).

С. Широколиственно-лесная зона. Подзоны: С1 – широколиственных лесов; С2 – лесостепи.

Д. Степная зона. Подзоны: D1 – северных (разнотравно-дерновинно-злаковых) степей; D2 – средних (сухих) степей; D3 – южных (опустыненных) степей.

Е. Пустынная зона. Подзоны: Е1 – северных пустынь; Е2 – средних пустынь.

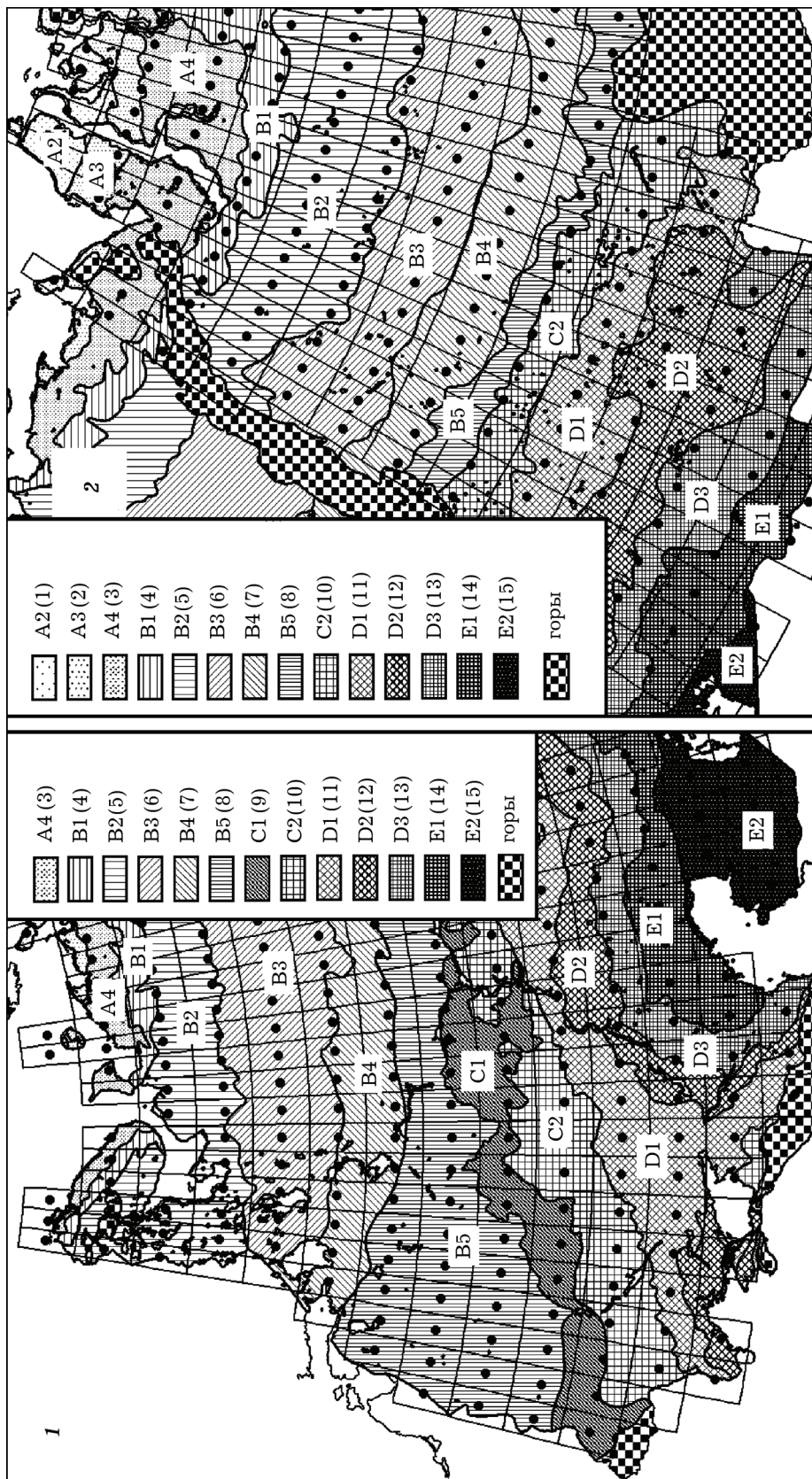


Рис. 1. Ячейки (полигоны) и узлы (точки) градусной сетки, к которым привязаны климатические данные, на фоне карты современной зональности растительности: 1 – ЕТР, 2 – ЗСб.

A2-E2 – подзоны растительности (см. в тексте). Числа в скобках – порядковые номера подзон, используемые далее при расчетах

Анализ проводился на уровне *подзон* растительности. В пределах рассматриваемой территории они пронумерованы с севера на юг: от 1 (А2) до 15 (Е2) (см. рис. 1).

На рис. 1 на фоне карты современной зональности растительности [11] показано распределение узлов и ячеек градусной сетки. Анализ проведен отдельно для узлов и ячеек, поскольку их пространственное сопряжение с границами подзон растительности несколько различно. Из анализа исключены узлы и ячейки, находящиеся за границами обозначенных на карте растительных выделов, а также острова (кроме наиболее крупных), горные территории и акватории морей. Каждому узлу и каждой ячейке присвоено значение номера соответствующей подзоны. Было принято:

– для узлов – узел находится в пределах подзоны;

– для ячеек – более 50 % площади ячейки находится в пределах подзоны, даже если ее геометрический центр (узел) расположен за пределами подзоны.

Анализ карты (см. рис. 1) показал, что значительное число узлов (не менее 20 %) находится на границах подзон. Примерно столько же ячеек делится этими границами пополам. Если учесть, что точность проведения самих зональных границ на карте условна, можно заключить, что отнесение конкретных узлов или ячеек к определенной подзоне в ряде случаев произвольно, особенно на севере территории, где широтная протяженность подзон минимальна. Тем не менее все узлы и ячейки (пусть с некоторыми допущениями) отнесены к конкретным подзонам.

Затем оценили связь (коэффициенты парной корреляции Пирсона) между значениями климатических показателей и подзональ-

ной приуроченностью узлов и ячеек (номерами подзон). Рассчитанные для этих показателей уравнения линейной регрессии в дальнейшем использованы для обоснования и построения прогнозной модели.

Обработка данных и расчеты осуществлены средствами СУБД MS Visual FoxPro и пакета STATISTIKA. Картографические работы проведены в среде ГИС MapInfo Professional.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Уровень связи между климатическими показателями и номерами подзон как для ЕТР, так и для ЗСб весьма высок (см. таблицу). Он несколько ниже для ГТК, а для суммы активных температур особенно значителен: 0,97 для ячеек и узлов как на ЕТР, так и в ЗСб. Полученные результаты дают основания для расчета регрессионных зависимостей подзональной принадлежности узлов и ячеек сетки от значений климатических показателей (рис. 2, 3).

Для показателя ГТК как на ЕТР, так и в ЗСб наблюдаются значительные отклонения от линии регрессии в области высоких широт – в тундре и в какой-то мере в лесотундре (см. рис. 2). При этом в ЗСб эти отклонения заметно больше, чем на ЕТР, что определяет меньшие абсолютные величины соответствующих коэффициентов корреляции (см. таблицу). Возможно, здесь имеет место нелинейная связь, но на данном этапе она не анализировалась, поэтому в дальнейшем ГТК не использовался для прогноза тенденций изменения границ подзон растительности.

Показатель сумм активных температур на ЕТР и в ЗСб демонстрирует линейную связь с зональностью растительности (см. рис. 3).

Коэффициенты корреляции значений климатических показателей с номерами подзон растительности*

Показатель	Подзональная приуроченность (номера подзон) узлов и ячеек сетки			
	ЕТР		ЗСб	
	Узлы	Ячейки	Узлы	Ячейки
ГТК Селянинова	-0,81	-0,79	-0,76	-0,74
Число дней с $T > 10$ °С	0,92	0,92	0,95	0,95
Сумма $T > 10$ °С	0,97	0,97	0,97	0,97

Примечание. * Все коэффициенты корреляции значимы при $p < 0,01$.

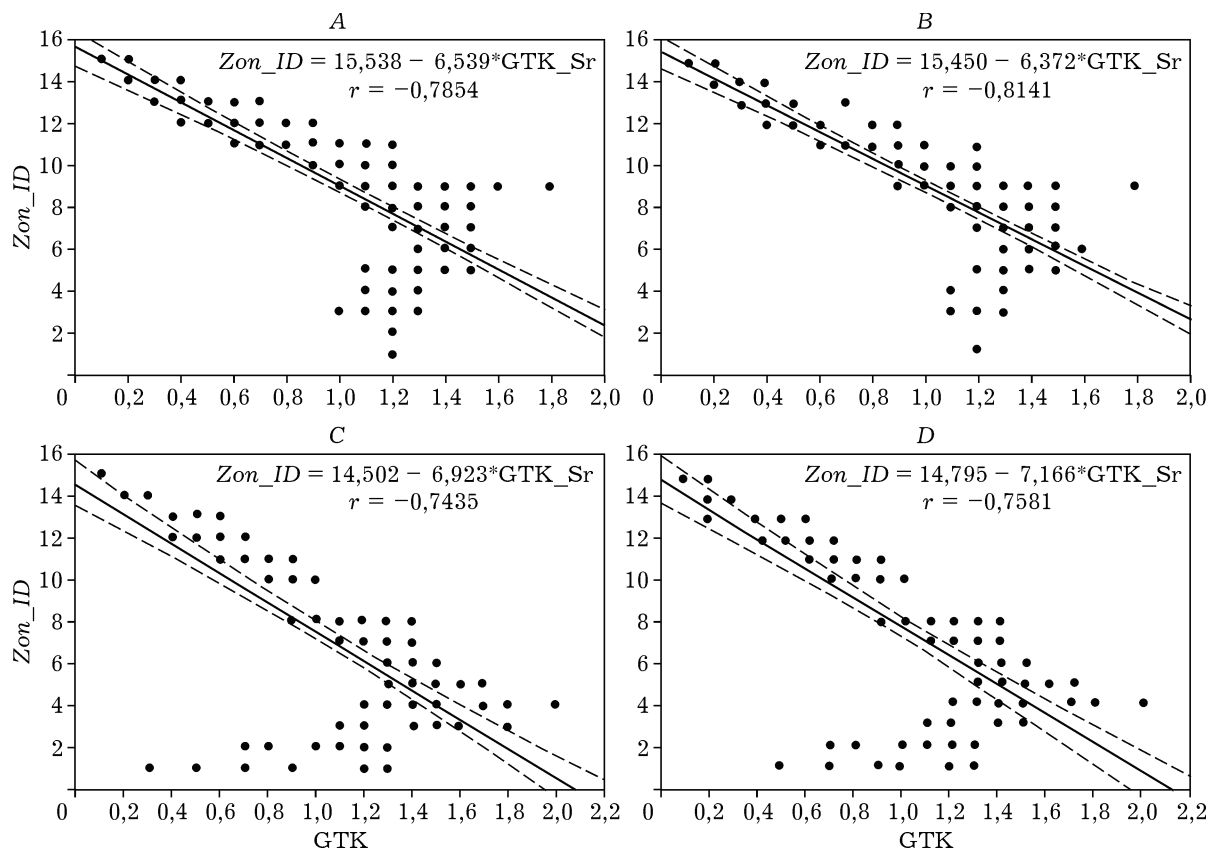


Рис. 2. Связь порядковых номеров подзон растительности (Zon_ID) с GTK Селянинова (GTK).

А, В – ЕТР (А – для ячеек, В – для узлов); С, D – ЗСб (С – для ячеек, D – для узлов)

Аналогичная картина получена и для показателя числа дней с активными температурами, хотя в этом случае теснота связи несколько ниже (см. таблицу), поэтому графики для последнего показателя не приводятся.

Таким образом, из рассмотренных климатических показателей наиболее предпочтительным для прогноза возможных тенденций изменения границ подзон растительности на ЕТР и в ЗСб в середине XXI в. признан показатель сумм активных температур, демонстрирующий наиболее тесную линейную связь с зональностью растительности (см. рис. 3 и таблицу).

Зависимости подзональной принадлежности узлов и ячеек сетки от значений показателя сумм активных температур описываются четырьмя уравнениями регрессии (см. рис. 3). Несколько модифицировав эти формулы (усреднив значения коэффициентов для узлов и ячеек), можно предложить следующие уравнения, применимые как к ячейкам, так и к узлам:

$$Zon_ID = 1 + 0,0034 \times Sum_T \text{ (ЕТР); } \quad (2)$$

$$Zon_ID = 0,49 + 0,0042 \times Sum_T \text{ (ЗСб), } \quad (3)$$

где Zon_ID – порядковый номер подзоны (1–15), Sum_T – сумма активных температур.

Представляет интерес тот факт, что уравнения (2, 3) заметно различаются. Возможным объяснением является неполнота набора подзон растительности в ЗСб – здесь отсутствует подзона широколиственных лесов (С1 – № 9 на рис. 1). Но это предположение требует проверки.

Подставляя в уравнения (2, 3) имеющиеся прогнозные значения Sum_T , можно определить потенциальное положение каждой ячейки градусной сетки в системе зональности, определяемое показателем суммы активных температур на 2046–2065 гг. То же можно применить и к узлам, но в этом случае картографическое представление результата будет менее наглядным.

Очевидно, что временной интервал между “периодом современного климата” (1961–

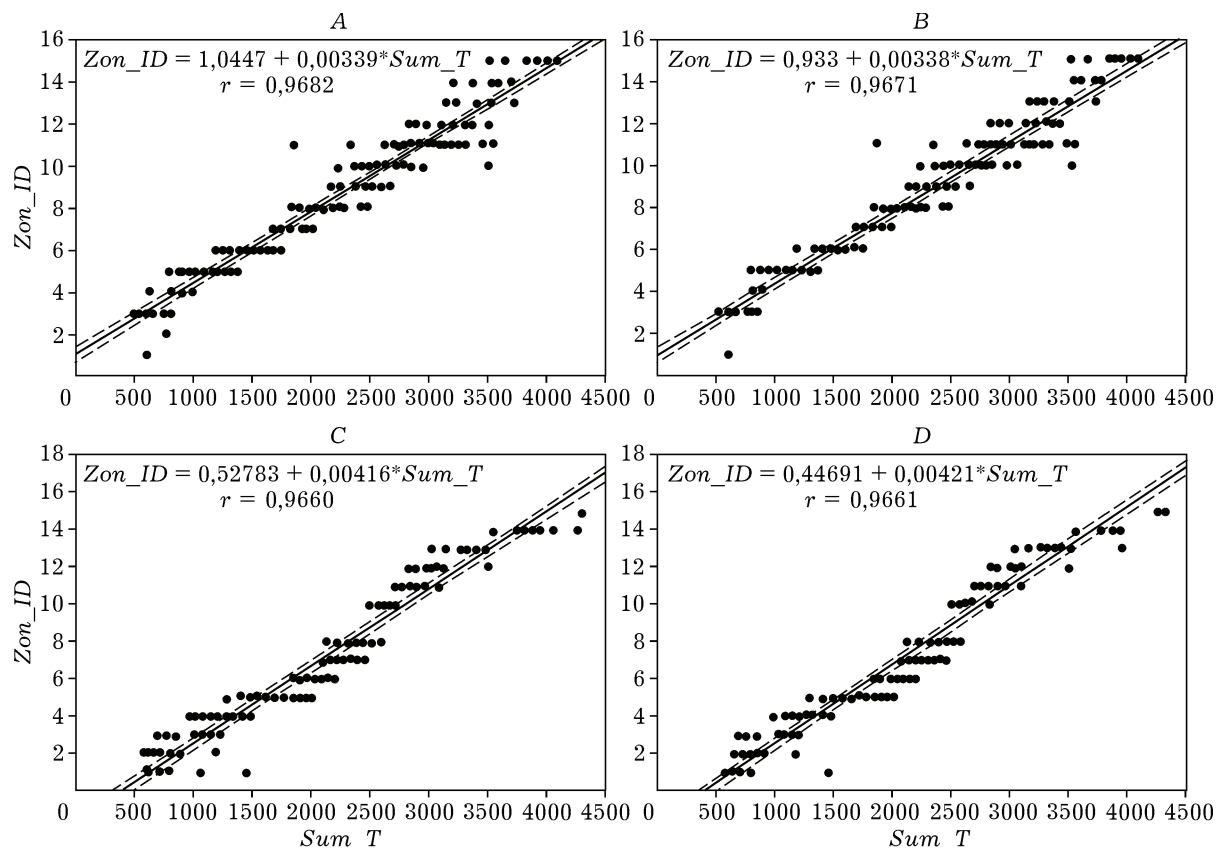


Рис. 3. Связь порядковых номеров подзон растительности (Zon_ID) с суммой активных температур (Sum_T).
 А, В – ЕТР (А – для ячеек, В – для узлов); С, D – ЗСб (С – для ячеек, D – для узлов)

1989) и прогнозным периодом (2046–2065) недостаточен, чтобы прогнозировать реальные изменения зональных границ, которые за такой срок если и могут проявиться, то лишь локально. Здесь можно говорить о потенциальных условиях существования растительности в середине XXI в. Инерционность растительности как системы в любом случае не позволит ей к середине XXI в. прийти в равновесие с изменяющимися климатическими условиями.

С учетом этих комментариев по уравнениям (2, 3) рассчитано и представлено в виде карт потенциальное положение конкретных ячеек сетки для ЕТР и ЗСб в системе подзон растительности, соответствующее прогнозируемому на период 2046–2065 гг. изменением термических условий (рис. 4).

Карты, приведенные на рис. 4, в сравнении с рис. 1 демонстрируют тенденцию смещения подзональных границ в будущем к югу почти для всей обсуждаемой территории.

Исключение составляют наиболее северные участки ЗСб, где смещения границ не прогнозируются, а также отдельные ячейки на севере ЕТР и ЗСб, для которых результаты прогноза по ряду причин признаны недостоверными.

Для большей наглядности рассчитаны “сдвиги” соответствующих значений подзональной приуроченности ячеек сетки. Под “сдвигом” понимается разность между прогнозным и современным значениями номера подзоны (1–15), к которой отнесена данная ячейка. “Сдвиг” может быть положительным (прогнозное значение больше современного – “потепление”), отрицательным (прогнозное значение меньше современного – “похолодание”) или “нулевым” (изменений не прогнозируется). Результирующие карты представлены на рис. 5.

На рис. 5 (в сравнении с рис. 1, 4) видно, что для тундры и лесотундры ЕТР прогнозируемые тенденции “сдвигов” границ под-

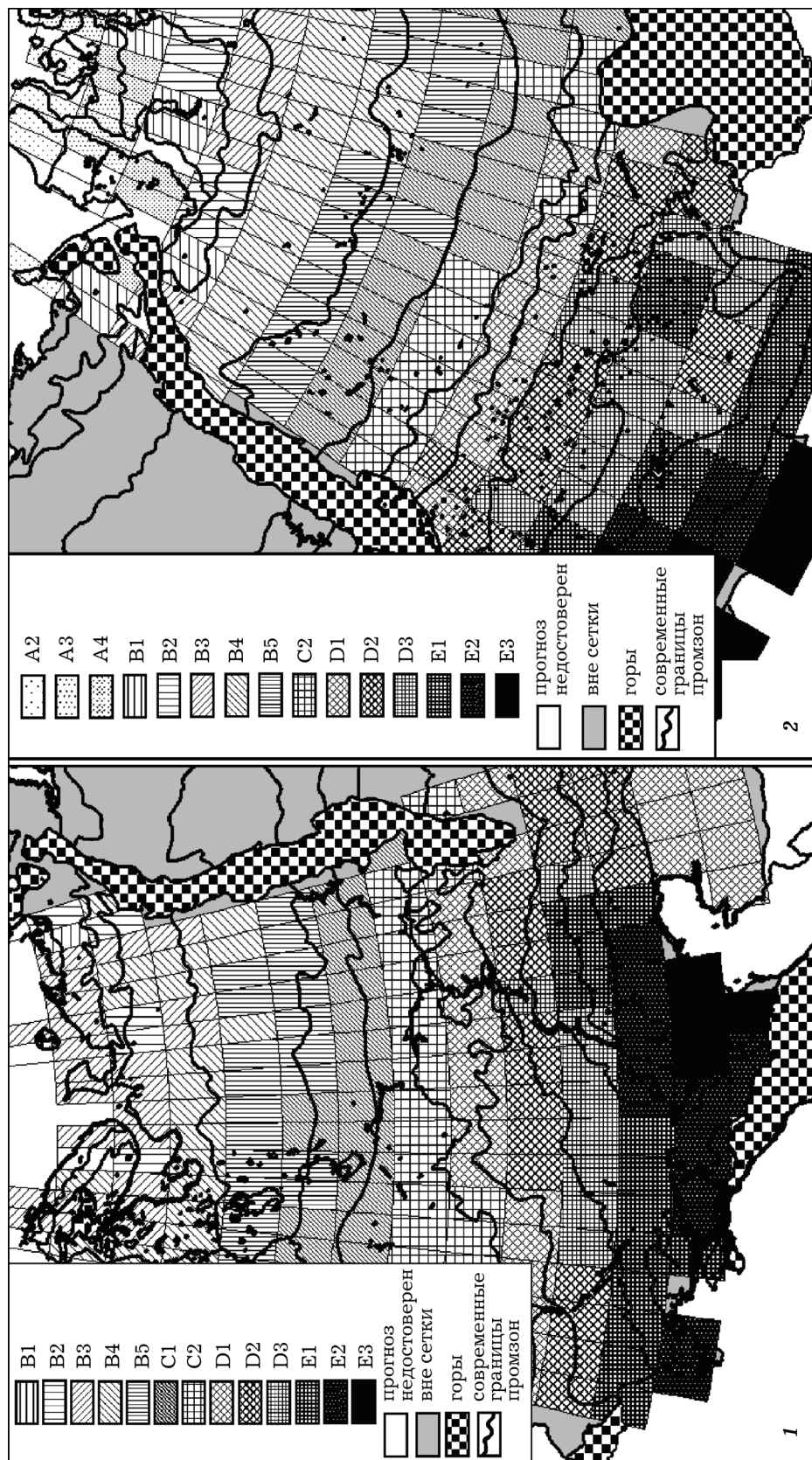


Рис. 4. Прогнозируемая на период 2046–2065 гг. потенциальная подзональная принадлежность ячеек сетки, определяемая суммой активных температур для ЕТР (1) и ЗСБ (2)
 А2–Е3 – индексы подзон растительности (см. текст и рис. 1), которым соответствуют ячейки сетки согласно прогнозируемой на 2046–2065 гг. температурной ситуации

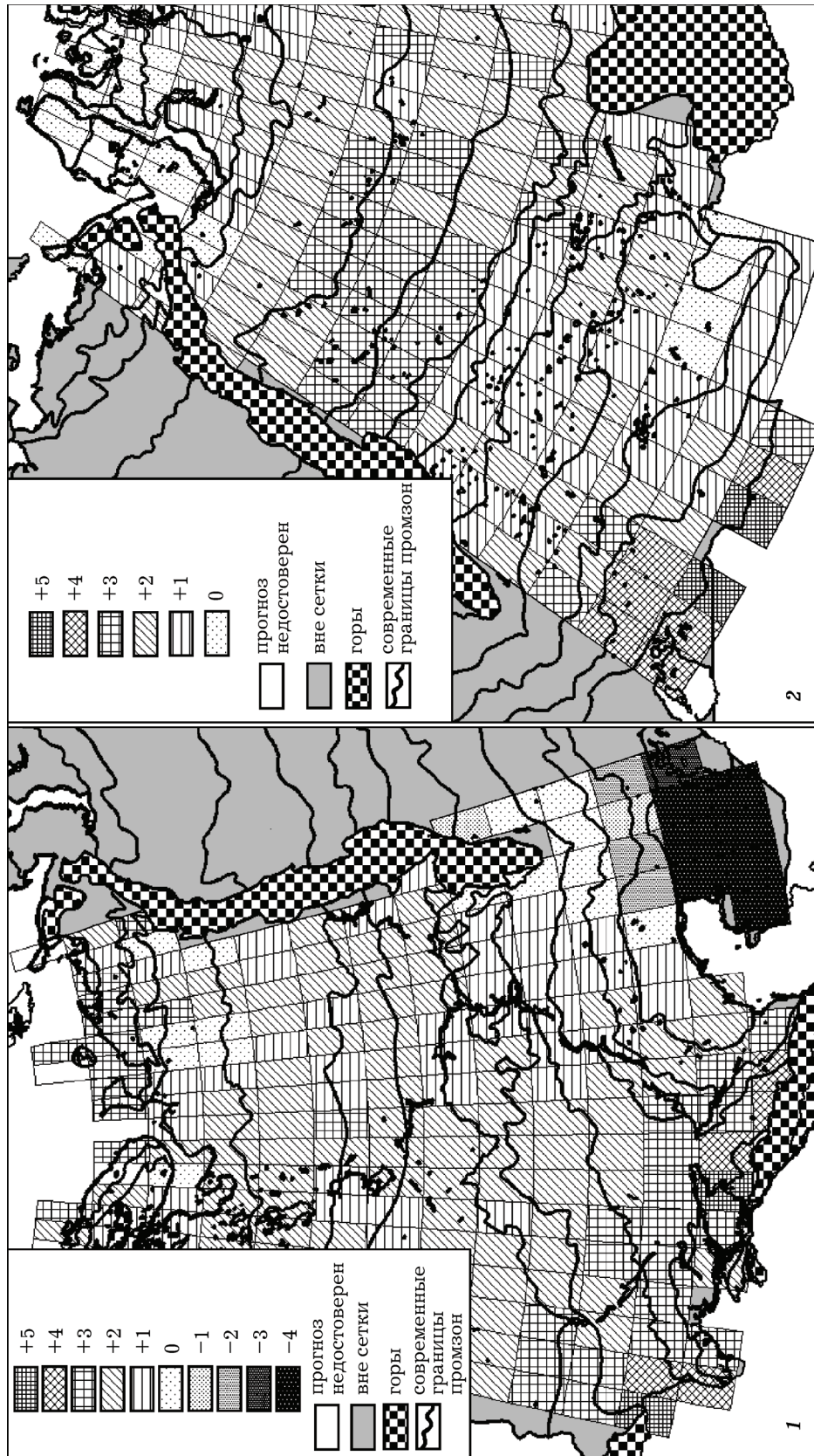


Рис. 5. Прогнозируемые "сдвиги" – изменения потенциальной подзональной принадлежности ячеек градусной сетки на период 2046–2065 гг., определяемые суммой активных температур для ЕТР (1) и ЗСб (2).
 (+5)–(–4) – значения "сдвига" (изменение номера подзоны): (+) – смещение подзональных границ к северу (потепление), (–) – смещение подзональных границ к югу (похолодание), (0) – "сдвига" нет

зон вполне соответствуют сложившимся представлениям. Предполагается распространение в северном направлении условий, благоприятных для лесной растительности. При этом на севере территории для отдельных ячеек прогнозируются весьма значительные «сдвиги», что приводит к ситуации, когда, например, на Кольском полуострове прогнозируемые температурные условия местами будут соответствовать современным условиям южной тайги или даже смешанных лесов (см. рис. 4).

На севере ЗСб имеется массив ячеек, для которых направление «сдвига» нулевое, либо результаты прогноза признаны недостоверными (см. рис. 4, 5). Это в некоторой степени противоречит существующим представлениям о том, что наиболее заметные подвижки границ древесной растительности наблюдаются и прогнозируются в лесотундре (см. выше). Возможно, дело в том, что *центroids* этих ячеек (для которых и рассчитаны все климатические показатели) зачастую находятся вне материка, что может приводить к существенным искажениям результатов расчетов.

Отрицательные «сдвиги» в пределах рассматриваемой территории прогнозируются главным образом вне России, на северо-западе Казахстана, а в пределах России – на Южном Урале (см. рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного анализа в основном подтверждают существующие представления о возможных изменениях зональных границ растительности, хотя в некоторых деталях отличаются от выявленных ранее другими исследователями закономерностей. Полученные результаты свидетельствуют, что прогнозируемые «сдвиги» границ подзон растительности, связанные с термическими условиями вегетационного периода (сумма активных температур), могут иметь как положительную направленность («потепление» – «сдвиг» условий, определяющих смещение ныне существующих подзональных границ, к северу: практически вся ЕТР и большая часть ЗСб), так и нулевую («сдвиг» нет: север ЗСб и отдельные ячейки на

ЕТР). На Южном Урале и на северо-западе Казахстана «сдвиги», согласно прогнозируемым изменениям температурных условий, могут иметь даже отрицательную направленность.

Необходимо подчеркнуть предварительный характер полученных результатов. Они иллюстрируют и дают количественную оценку связи зональности растительности с суммой активных температур, которая является лишь одним из многочисленных показателей климатических условий. В обсуждаемой модели не учитываются чрезвычайно важные для растительности условия увлажнения, что диктует необходимость в дальнейшем детально проанализировать связь зональности растительности с другими климатическими характеристиками. Для верификации выявленных закономерностей необходимо также проведение целенаправленных комплексных полевых исследований в различных регионах ЕТР и ЗСб.

Исследование выполнено в рамках Государственного контракта № 02.515.11.5088 от 26.06.2008 «Исследования региональных экологических последствий изменений климата и разработка мер по адаптации населения и экономики регионов к ним».

ЛИТЕРАТУРА

1. Турманина В. И. Фитоиндикация колебаний климата // Ландшафтная индикация природных процессов: тр. МОИП. 1976. Т. 15. С. 64–70.
2. Величко А. А. Зональные и макрорегиональные изменения ландшафтно-климатических условий, вызванных «парниковым эффектом» // Изв. РАН. Сер. геогр. 1992. № 2. С. 89–101.
3. Малхазова С. М., Минин А. А., Леонова Н. Б., Румянцев В. Ю., Солдатов М. С. Тенденции возможных изменений растительности на европейской территории России и в Западной Сибири // Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири / под ред. Н. С. Касимова, А. В. Кислова. М.: МАКС Пресс, 2011. С. 342–388.
4. Харук В. И., Рэнсон К. Дж., Им С. Т., Наурызбаев М. М. Лиственничники лесотундры и климатические тренды // Экология. 2006. № 5. С. 323–331.
5. Харук В. И., Двинская М. Л., Рэнсон К. Дж., Им С. Т. Проникновение вечнозеленых хвойных деревьев в зону доминирования лиственницы и климатические тренды // Там же. 2005. № 3. С. 186–192.
6. Горопов П. А. Температурный режим и условия увлажнения Восточно-Европейской равнины в контрастных климатических эпохах: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2006. 24 с.

7. Кислов А. В. Динамика климата в XX и XXI веках // Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири / под ред. Н. С. Касимова, А.В. Кислова. М.: МАКС Пресс, 2011. С. 14–49.
8. Кислов А., Гребенец В., Евстигнеев В., Малхазова С., Румянцев В., Сидорова М., Солдатов М., Суркова Г., Шартова Н. Комплексная оценка последствий потепления климата XXI века на севере Евразии // Изменение климата. Европа, Северная Азия, Северная Америка. 4-е Европейские диалоги в Эвиане / под ред. М. Табо, А. Кислова. Eurcasia: Copy-Media, 2011. С. 83–96.
9. Kislov A., Grebenets V., Evstigneev V., Malkhazova S., Rumiantsev V., Sidorova M., Soldatov M., Surkova G., Shartova N. Estimation systemique des consequences du rechauffement climatique au XXI siecle dans le Nord Eurasien // Le Changement Climatique. Europe, Asie Septentrionale, Amerique du Nord. Quatriemes Dialogues Europeens d'Evian / eds per M. Tabeaud, A. Kislov. Eurcasia: Copy-Media, 2011. P. 75–88.
10. Суркова Г. В. Гидротермические ресурсы Восточно-Европейской равнины при потеплении XXI века // Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: МАКС Пресс, 2008. С. 137–166.
11. Зоны и типы поясности растительности России и сопредельных территорий (карта М 1 : 8 000 000) / под ред. Г. Н. Огуревой. М.: Изд-во ТОО “Экор”, 1992.

Forecast of Possible Changes of Vegetation Zone Boundaries in European Russia and West Siberia in Connection with Global Warming

V. Yu. RUMIANTSEV, S. M. MALKHAZOVA, N. B. LEONOVA, M. S. SOLDATOV

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, Chair of Biogeography
119991, Moscow, Leninskie Gory-1
E-mail: vyurum@biogeo.ru*

Connections between the vegetation zone boundaries and some climatic indexes are discussed. Possible changes of the boundaries of vegetation subzones at the territory of European Russia and West Siberia are predicted within the framework of one of the scenarios of global warming. The revealed regularities allow us to propose a mathematic-cartographical model of vegetation zonality for the period of 2046–2065.

Key words: vegetation zonality, global warming, climatic indexes, forecast, mathematic-cartographical model.