

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ И СОСЕДНИХ СТРАН ПРИ ЗАДАННОМ УРОВНЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

*С.М. Семенов\**, *Г.В. Груза*, *Э.Я. Ранькова*, *И.О. Попов*, *С.Н. Титкина*

Россия, Москва 107258, ул. Глебовская, д. 20Б, Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, \*sergeysemenov1@yandex.ru

**Реферат.** Оценены климатические изменения параметров температурного режима на территории России и соседних стран, соответствующие глобальному потеплению на  $1,5^{\circ}\text{C}$  по отношению к уровню 1981-2000 гг. Температурный режим характеризовался годовым ходом среднесуточной приповерхностной температуры в косинусоидальном приближении. Установлено, что на большей части территории России ожидается увеличение среднегодовой температуры и уменьшение амплитуды годового хода среднесуточной температуры. Наиболее сильно эта тенденция будет выражена на юге Сибири. В комбинации это приведет к наиболее выраженному росту средних температур холодного периода года. Время достижения максимума среднесуточной температурой в календарном году на территории России в основном сдвинется в сторону более ранних дат, но незначительно – до 1 недели.

**Ключевые слова.** Глобальное потепление, региональный отклик, территория России, температурный режим.

## DISTRIBUTION OF SURFACE TEMPERATURE OVER TERRITORY OF RUSSIA AND NEIGHBORING COUNTRIES FOR GIVEN LEVEL OF GLOBAL WARMING

*S.M. Semenov\**, *G.V. Gruza*, *E.Ya. Ran'kova*, *I.O. Popov*, *S.N. Titkina*

Institute of Global Climate and Ecology, Glebovskaya str., 20B, Moscow 107258, Russia, \*sergeysemenov1@yandex.ru

**Abstract.** Climatic changes in parameters of temperature regime in Russia and neighboring countries corresponding to the global warming by  $1,5^{\circ}\text{C}$  above the 1981-2000 level are assessed. Temperature regime is characterized by yearly course of daily mean surface temperature. Its cosine approximation is employed. It is found that over most of Russian territory an increase in the annual temperature and decrease in the

amplitude of yearly course of daily mean temperature are expected. This tendency will be mostly pronounced in the southern Siberia. In Russia, a moment when daily mean temperature reaches its maximum within calendar year will shift mainly to earlier dates. However, the shift will be small, up to one week.

**Key words.** Global warming, regional response, Russian territory, temperature regime.

## Введение

Обеспокоенность современными тенденциями изменения глобального климата и их последствиями, существующая в обществах многих стран мира, привела к тому, что и на национальном, и на международном уровне делаются определенные шаги в направлении регулирования антропогенного воздействия на климатическую систему Земли. Для обоснования этих шагов необходимо, в частности, иметь информацию о возможных будущих климатах.

Изучение будущих климатов сейчас проводится чаще всего с помощью глобальных климатических моделей – совместных Моделей Общей Циркуляции Атмосферы и Океана (МОЦАО). Эти модели описывают основные процессы, участвующие в формировании климата: приход лучистой энергии от Солнца, массо- и энергоперенос в системе атмосфера–океан–земная поверхность и уход инфракрасной радиации в космос. Поскольку такие модели состоят из сотен и даже тысяч уравнений, имеют множество переменных и параметров, то в расчетах долговременных изменений гидрометеорологических величин в пространстве и во времени имеются значительные неопределенности.

Кроме того, существуют и внешние условия, которые надо задавать при расчете будущих климатов. Ведь в МОЦАО учитываются антропогенные воздействия на климатическую систему, а именно антропогенное обогащение атмосферы парниковыми газами в ходе хозяйственной деятельности. Такое изменение состава земной атмосферы приводит к потеплению вследствие усиления парникового эффекта. Однако, каковы будут антропогенные эмиссии парниковых газов (углекислого газа, метана, закиси азота и пр.) в атмосферу через несколько десятков лет, точно не известно. Это зависит от пути развития мирового хозяйства, а возможностями его точного предсказания наука пока не располагает.

Поэтому, обычно рассматриваются несколько возможных сценариев мирового хозяйственного развития. С каждым из них можно связать определенные технологии и соответствующие объемы антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу на перспективу. Подобные сценарии были построены и опубликованы самом начале XXI века при участии Межправительственной группы экспертов по изменению климата – МГЭИК (Special Report..., 2000). Недавно были разработаны новые сценарии для XXI века – семейство RCP, Representative Concentration Pathways (Moss et al., 2007).

Использование «полных» физико-математических динамических моделей (МОЦАО) в настоящее время основной метод изучения будущих климатов в условиях антропогенного воздействия на климатическую систему. В то же время необходимо отметить, что:

- ✓ результатам долгосрочного моделирования климата с помощью МОЦАО свойственна значительная неопределенность;
- ✓ каждый запуск МОЦАО требует большой подготовительной работы штата квалифицированных специалистов и значительного технологического ресурса;

Поэтому, в дополнение к технологиям изучения будущих климатов, основанным на применении МОЦАО, целесообразно иметь арсенал более простых инструментов, доступных широкому кругу специалистов. Такие модельные средства для изучения климата бывают двух типов:

- ✓ физико-математические динамические модели минимальной и промежуточной сложности (Елисеев и др., 2008; Елисеев, Мохов, 2008; Семенов, 2004); это – методологические аналоги МОЦАО, но малопараметрические и сильно агрегированные;
- ✓ физико-статистические модели, опирающиеся непосредственно на данные наблюдений за климатом (Груза, Ранькова, 2012); они основаны на статистическом анализе связей между разными параметрами климата и воздействующими факторами.

Данная работа посвящена описанию будущего климата, полученному с помощью одной моделей последнего типа. Эта модель связывает изменение глобальной температуры у поверхности земли с ее региональными изменениями (в координатных квадратах  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ )

годового и месячного разрешения. Для целей расчета некоторых прикладных статистических индексов (например, суммы эффективных температур и суммы активных температур) дополнительно получена МНК-оценка климатического годового хода среднесуточной температуры в форме косинусоидальной функции с тремя параметрами  $[a + b \cos((2\pi/365)(t - t_0))]$ , где  $t$  – время в сутках в пределах календарного года (значение  $t = 0$  соответствует 0 часов 1 января).

С помощью развитой техники оценены климатические значения этих параметров температурного режима для территории России и соседних стран для базового периода 1981-2000 гг. и для ситуации, когда средняя глобальная температура превысит уровень 1981-2000 гг. на  $1,5^\circ\text{C}$ , что примерно соответствует превышению доиндустриального значения на  $2^\circ\text{C}$ .

Последняя цифра есть «глобальная цель», зафиксированная на Шестнадцатой конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата в Канкуне (Мексика) в 2010г. (Report of the Conference of the Parties..., 2011). Таким образом, полученное в данной работе описание будущего климата может помочь специалистам по воздействиям оценить его опасность или же благоприятность для природных и хозяйственных систем, для здоровья населения. Эта оценка (в отличие от расчетов с помощью динамических моделей) основана на единственном «консервативном» предположении: статистические связи между глобальными и региональными изменениями температуры, имевшие место в XX веке, сохранятся в XXI веке.

## Методы

### *Оценки для базового периода 1981-2000 гг.*

Оценки абсолютных значений среднемесячной температуры в приповерхностном слое (на высоте 2 м над сушей и в среднем в слое 0 – 10 м в морях и океанах) в 1981-2000 гг. основаны на следующих данных, депонированных в сети ИНТЕРНЕТ Отделом климатических исследований Университета Восточной Англии, Великобритания (Climate Research Unit, University of East Anglia, UK):

- ✓ глобальные поля норм за 1961-1990 гг. (файл abstem.dat, 12 полей с данными в 2592 боксах  $5^\circ \times 5^\circ$ ;  
<http://www.cru.uea.ac.uk>);

- ✓ глобальные поля аномалий относительно норм 1961-1990 гг. (файл hadcrut3.txt; данные для 2592 боксов  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  за 12 месяцев календарного года за период 1850-2011 гг.; <http://www.cru.uea.ac.uk>);
- ✓ временные ряды глобально осредненных аномалий среднегодовых и среднемесячных значений за 1850-2011 гг. (файл hadcrut3.txt; <http://www.cru.uea.ac.uk>)

В заданном боксе для каждого месяца каждого года в пределах 1981-2000 гг. среднемесячное значение температуры рассчитывалось как сумма аномалии относительно нормы за 1961-1990 гг. и нормы. Если при этом отсутствовали данные о норме за 1961-1990 гг. или же об аномалии, то расчет для этого месяца не производился (констатировалось отсутствие данного).

Далее, для заданного бокса и календарного месяца рассматривался ряд значений температуры для 1981, 1982, ..., 2000 гг. Если в ряду присутствовали менее трех данных, то оценка нормы за 1981-2000 гг. не производилась (констатировалось отсутствие данного). Если же в наличии было не менее трех данных, то строилась линейная регрессии температуры на время. Значение этой линейной функции в средней точке ( $t = 1990,5$ ) принималось за норму для 1981-2000 гг.

### *Глобальное потепление за индустриальный период*

За начало индустриального периода принято двадцатилетие 1881-1900 гг. Именно в это время начинает заметно расти антропогенная эмиссия углекислого газа в атмосферу.

Среднее значение глобально осредненной аномалии температуры земного шара за 1881-1900 гг. относительно уровня 1961-1990 гг. равно  $-0,34^{\circ}\text{C}$ . Это значение характеризует доиндустриальный уровень температуры.

Среднее значение аномалии температуры за 1981-2000 гг. относительно уровня 1961-1990 гг. равно  $0,17^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, период 1981-2000 гг. теплее доиндустриального на  $\sim 0,5^{\circ}\text{C}$  (оценка выполнена по данным файла hadcrut3.txt).

Следовательно, глобальное потепление на  $2^{\circ}\text{C}$  по отношению к доиндустриальному уровню эквивалентно потеплению на  $1,5^{\circ}\text{C}$  по отношению к уровню 1981-2000 гг.

### *Связь изменения глобальной температуры с региональными*

Для того, чтобы оценить изменения температуры в региональном масштабе, соответствующие заданному глобальному изменению, в работе (Семенов и др., 2008) были получены оценки чувствительности региональных среднегодовых температур к изменению среднегодовой глобальной температуры. Оценки были выполнены статистически путем совместного анализа рядов среднегодовой температуры воздуха за 1910 – 2005 гг. – глобальной и для пространственных пятиградусных «боксов»  $5^\circ \times 5^\circ$  (Brohan et al., 2005; <http://www.cru.uea.ac.uk>). При совместном анализе в каждой такой паре рядов ряд глобальной температуры – переменная  $X$ , а региональной – переменная  $Y$ .

В качестве оценки чувствительности для каждого такого «бокса» принимается значение коэффициента регрессии  $b$ :

$$b_{Y/X} = r_{Y,X} \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} ,$$

для которого оценкой стандартного отклонения является

$$s_b = \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} \sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}}$$

Здесь  $r$  – коэффициент корреляции, а  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$  – стандартные отклонения соответствующих переменных.

Значение  $b$  характеризует чувствительность региональной температуры (т.е. в данном случае – средней по соответствующему боксу  $5^\circ \times 5^\circ$ ) к изменению глобальной: это, в линейном приближении, есть изменение региональной среднегодовой температуры  $\Delta T_{\text{рег}}$ , соответствующее изменению глобальной температуры  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ . В общем случае:

$$\Delta T_{\text{рег}} = b \Delta T .$$

Доверительный интервал оценки  $\Delta T_{\text{рег}}$  можно получить, заменив значение  $b$  его квантилями  $b \pm k s_b$ , где  $k$  зависит от назначенной доверительной вероятности. Границами 95%-го доверительного интервала являются 2,5-й и 97,5-й процентиля, которым при нормальном распределении соответствуют значения  $k = \pm 1,96$ . Для уменьшения статистического шума проводится дополнительно 9-точечное сглаживание с помощью фильтра

$$B_{ij} = \left( \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 w_{kl} b_{i+k, j+l} \right) / \left( \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 w_{kl} \right) .$$

Здесь  $i$  и  $j$  – номера боксов в соответствии с широтой и долготой (от 1 до 18 и от 1 до 72 для сетки 5-градусных боксов в Северном полушарии);  $b_{ij}$  – расчетное значение чувствительности; а  $w$  – весовые коэффициенты:  $w_{0,0} = 2$  (коэффициент для центральной точки),  $w_{\pm 1,0} = w_{0,\pm 1} = 1$  (коэффициенты для центральных точек на соседних параллелях и меридианах) и  $w_{\pm 1,\pm 1} = 0,5$  (коэффициенты для угловых точек).

Результаты применения такой процедуры для оценки чувствительности региональных среднегодовой температуры и среднемесячных температур к изменению среднегодовой глобальной температуры по данным за 1909-2008 гг. изложены в работе (Груза и др., 2009). Это сделано как для средних значений  $B$ , так и для их доверительных интервалов. Оценки значений  $B$  выполнены для каждого календарного месяца, т.е. для каждого бокса  $(i, j)$  получены 13 оценок чувствительности  $B_{ij}^0, B_{ij}^1, B_{ij}^2, \dots, B_{ij}^{12}$  – для года и каждого календарного месяца. На рис. 1 приведена результирующая карта-схема этих оценок чувствительности.

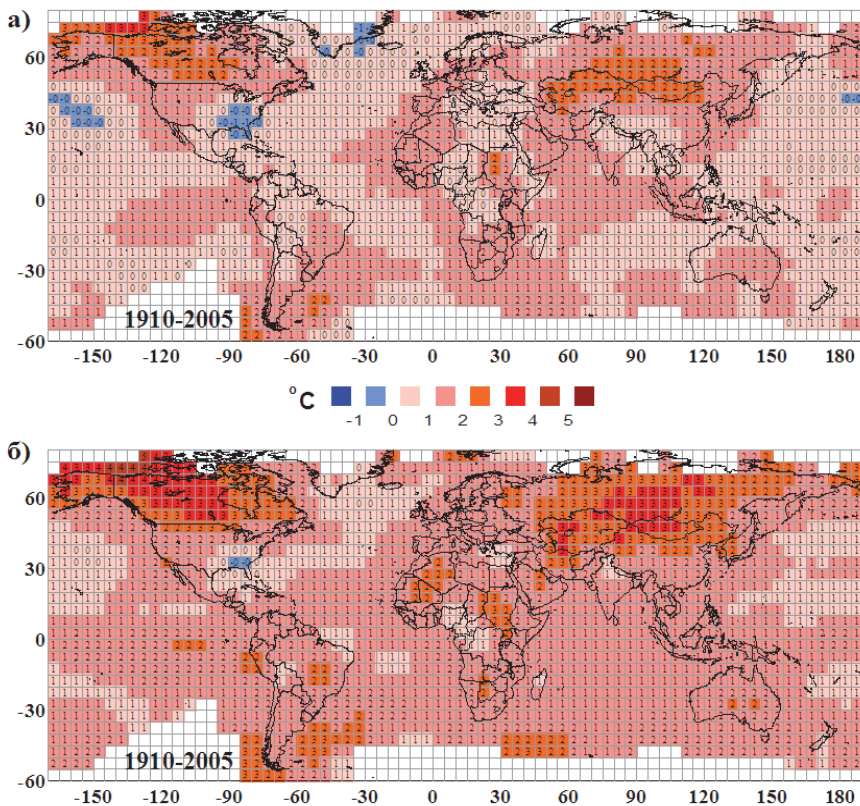
### ***Оценка будущего температурного режима***

Для каждого пространственного бокса  $5^\circ \times 5^\circ$  с номерами  $(i, j)$  климатическое значение среднемесячной температуры  $T_{ij}^n$  за  $n$ -й месяц календарного года, соответствующее увеличению глобальной среднегодовой температуры на  $\Delta T$  по отношению к уровню  $T_0$  в 1981-2000 гг., принимается равным

$$T_{ij}^n = T_{ij0}^n + B_{ij}^n \Delta T, (1)$$

где  $n$  – порядковый номер месяца в календарном году,  $B_{ij}^n$  – оценка чувствительности среднемесячной температуры за  $n$ -й месяц в этом боксе к 1-градусному увеличению глобальной среднегодовой температуры,  $T_{ij0}^n$  – климатическое значение температуры за  $n$ -й месяц в боксе  $(i, j)$  в 1981-2000 гг.

Для оценки реакции климатических значений среднемесячных температур на увеличение среднегодового значения глобальной температуры на  $1,5^\circ\text{C}$  надо в формуле (1) положить  $\Delta T = 1,5^\circ\text{C}$ .



**Рис. 1.** Оценки чувствительности региональной температуры к изменению глобальной, построенные по данным за 1909-2008 гг. (Груза и др., 2009): а) среднее значение, б) верхняя граница 95%-го доверительного интервала. Белый цвет – недостаток данных.

### **Переход к среднесуточным значениям**

При исследовании возможных последствий изменения климата часто необходимо знать не только климатические значения среднемесячной температуры для какого-либо периода, но и климатические характеристики годового хода среднесуточной температуры.

Эта задача решается в косинусоидальном приближении годового хода  $f(t) = [a + b \cos((2\pi/365)(t - t_0))]$ , где  $t$  – время (в сутках) в пределах года, считая с нуля часов 1 января. Параметры этой функции имеют следующий физический смысл:  $a$  – среднегодовая



температура,  $b$  – амплитуда годового хода среднесуточной температуры,  $t_0$  – время достижения среднесуточной температурой годового максимума.

По заданным 12-ти значениям годового хода среднемесячной температуры параметры  $a$ ,  $b$  и  $t_0$  определяются с помощью метода наименьших квадратов. А именно, их значения должны обеспечивать минимум суммы:

$$\sum_{n=1}^{12} \frac{(T^n - f^n)^2}{S_n^2}$$

Здесь для простоты номера бокса  $(i, j)$  опущены;  $T^n$  – среднемесячная температура  $n$ -го календарного месяца,  $f^n$  – среднее значение функции  $f(t)$  за этот месяц, а  $S_n$  – среднеквадратическое отклонение для  $T^n$ . Если среднеквадратические отклонения неизвестны, то они считаются одинаковыми для всех месяцев. Год всегда считается невисокосным.

## Результаты и обсуждение

### *Оценки чувствительности региональной температуры к изменению глобальной*

В целом, данные о чувствительности региональной температуры к изменению глобальной, приведенные на рис. 1а, можно обобщить следующим образом. При переходе на региональный уровень минимальная чувствительность (не более единицы) отмечается на океанах. Здесь сигнал глобального потепления, как правило, существенно не усиливается. Исключения составляют регионы, расположенные к западу и к востоку от южной оконечности Южной Америки, к юго-востоку от южной оконечности Африки, а также прибрежные зоны на северо-западе Северной Америки, где наблюдается особенно высокая чувствительность ( $2 - 3^1$ ).

В северной части Северной Америки – на территории Канады (кроме восточной части) и на Аляске (США) – наблюдается обширная зона высокой чувствительности ( $2 - 3$ ). В Южной Америке небольшая зона высокой чувствительности ( $2$ ) расположена на территории Бразилии.

---

<sup>1</sup> Здесь и далее при обобщении данных о региональной чувствительности в скобках приводятся ее оценки, округленные до целых градусов.

В Евразии (в средней и южной части Западной и Восточной Сибири), на территории Монголии и на севере Китая, в Центральной Азии и на территории Ирана выявлена обширная область высокой чувствительности (в основном, 2).

В Африке отмечены две зоны высокой чувствительности (2): на северо-западе (на территории Алжира, Мали и Мавритании) и на востоке (на территории Судана).

В Австралии обнаружена лишь одна небольшая зона высокой чувствительности (2) – на востоке.

Следует отметить, что прибрежные зоны континентов (включая арктическое побережье) практически нигде не обнаружили высокой чувствительности, за исключением северо-запада Северной Америки.

***Изменения температурного режима на территории России и соседних стран при глобальном потеплении на 1,5°C относительно уровня 1981-2000 гг.***

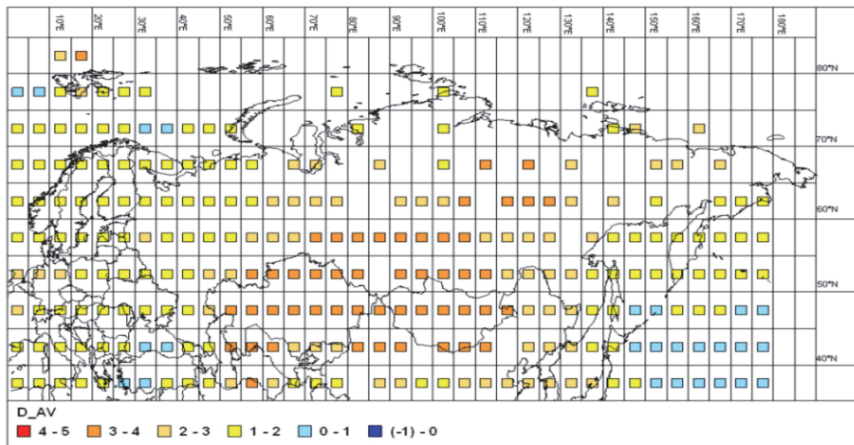
На рис. 2, 3 и 4 приведены, соответственно, изменения при глобальном потеплении на 1,5°C по отношению к уровню 1981-2000 гг.:

- ✓ климатического значения среднегодовой температуры при глобальном потеплении на 1,5°C по отношению к уровню 1981-2000 гг.;
- ✓ климатического значения амплитуды годового хода среднесуточной температуры при глобальном потеплении на 1,5°C по отношению к уровню 1981-2000 гг.;
- ✓ времени достижения среднесуточной температурой своего максимального значения в календарном году (климатический годовой ход аппроксимирован косинусоидальной функцией).

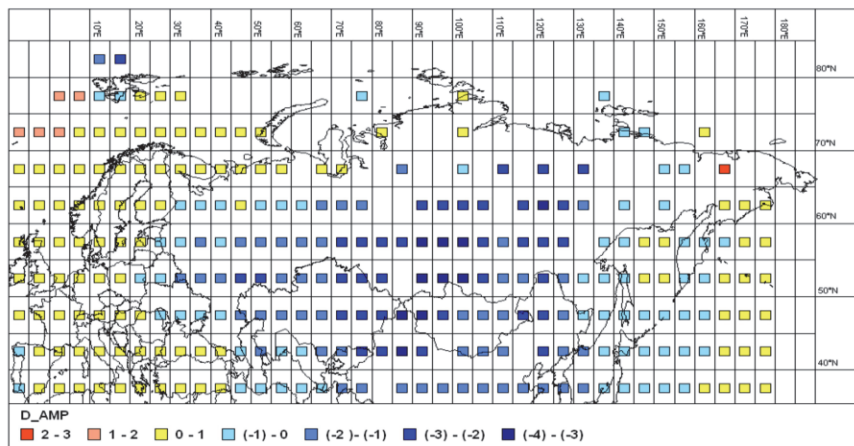
Представленные оценки предстоящих изменений климатических характеристик температурного режима на территории России и соседних стран при глобальном потеплении на 1,5°C по отношению к уровню 1981-2000 гг. (или на 2°C по отношению к доиндустриальному уровню) можно кратко охарактеризовать следующим образом.

В соответствии с полученными оценками, можно ожидать, что в России на всей территории в среднегодовом аспекте произойдет потепление на 1 – 4°C в зависимости от региона. Увеличение среднегодовой температуры будет наиболее выраженным (до 3 –

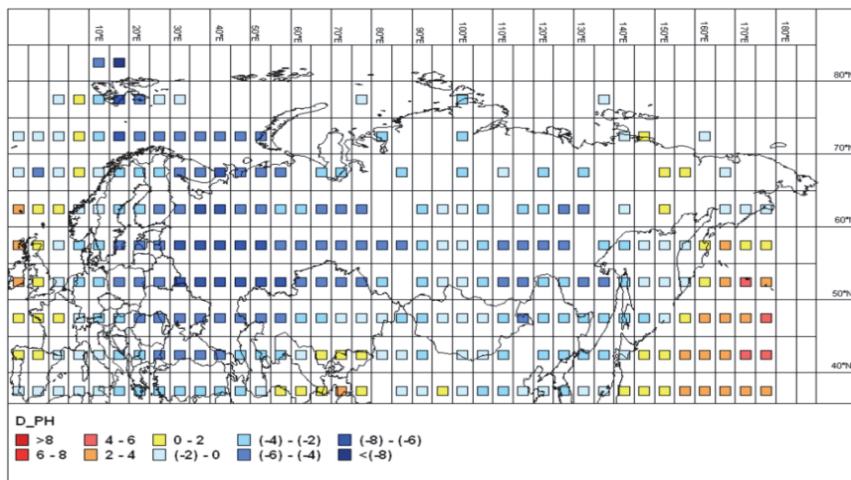
4°C) на севере Якутии и на юге Сибири. Последняя область есть часть обширной области потепления, охватывающей Казахстан, страны Центральной Азии, Монголию и примыкающие к ним районы Китая.



*Рис. 2. Ожидаемое среднее изменение климатического значения среднегодовой температуры при глобальном потеплении на 1,5°C по отношению к уровню 1981-2000 гг.*



*Рис. 3. Ожидаемое среднее изменение амплитуды климатического годового хода среднесуточной температуры при глобальном потеплении на 1,5°C по отношению к уровню 1981-2000 гг.*



*Рис. 4. Ожидаемое среднее изменение времени максимума в климатическом годовом ходе среднесуточной температуры (климатический годовой ход аппроксимирован косинусоидальной функцией) при глобальном потеплении на 1,5°C по отношению к уровню 1981-2000 гг.*

При этом, на большей части территории – кроме Чукотки и примыкающих к океаническому побережью северных районов, расположенных западнее 110° в.д., – произойдет уменьшение амплитуды годового хода среднесуточной температуры. Оно будет наиболее выражено (до  $-3 \dots -2^{\circ}\text{C}$ ) примерно там же, где ожидается наибольшее увеличение среднегодовой температуры. Это означает, что наибольший рост температуры ожидается в холодное время года.

И, наконец, время достижения среднесуточной температурой максимального значения (для косинусоидального приближения климатического годового хода среднесуточной температуры) будет сдвигаться в сторону ранних дат практически на всей рассматриваемой территории. Исключения – некоторые районы Камчатки и районы на юге Центральной Азии. Максимальные значения сдвига – до 1 недели – произойдут в центральных областях европейской части России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. 2012. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата Российской Федерации: температура воздуха. – М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». 293 С.
2. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Платова Т.В. 2010. Оценка сезонных особенностей региональных проявлений изменения глобального климата. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН». Т. 23, С.11-22.
3. Елисеев А.В., Мохов И.И. 2008. Влияние вулканической активности на изменение климата последних нескольких веков: оценки с климатической моделью промежуточной сложности. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 44, № 6. С. 723-746.
4. Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. и др. 2008. Взаимодействие метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 44, № 2. С. 147-162.
5. Семенов С.М. 2004. Парниковые газы и современный климат Земли. – М.: Издательский центр «Метеорология и гидрология». 175 С.
6. Семенов С.М., Израэль Ю.А., Груза Г.В., Ранькова Э.Я. 2008. Изменения глобальной температуры и региональные риски при некоторых стабилизационных сценариях антропогенной эмиссии диоксида углерода и метана. В кн.: Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 6. Изменения климата: влияние земных и внеземных факторов. Отв. ред. Г. С. Голицын. – М.: ИФА РАН, ИФЗ РАН. С. 24-36.
7. Brohan P., Kennedy J.J., Haris I., Tett S.F. B., Jones P.D. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *J. Geophysical Research*. V. 111. D12106, doi:10.1029/2005JD006548
8. Moss R., Babiker M., Brinkman S., Calvo E., Carter T. et al. 2007. Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies. IPCC Expert Meeting Report. 19-21 September, 2007, Noordwijkerhout, The Netherlands. 124 P.
9. Report of the Conference of the Parties on its sixteenth session, held in Cancun from 29 November to 10 December 2010. Framework Convention on Climate Change. FCCC/CP/2010/7/Add.1/, 15 March 2011. 31 P.
10. Special Report on Emission Scenarios (N. Nakićenović et al.). 2000. A special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 599 P.