

Е.В. ХАРИЮТКИНА, С.В. ЛОГИНОВ

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
634055, Томск, проспект Академический, 10/3, Россия, kh\_ev@mail2000.ru, logsv13@imces.ru

### ТЕНДЕНЦИИ ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ НА ГЛУБИНАХ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА

*Представлены результаты исследования пространственно-временной изменчивости температуры приземного воздуха и температуры почвы на глубинах на территории Западной Сибири в конце XX и начале XXI вв. Установлено, что на севере и юге региона наблюдаются сезонные различия во временных изменениях климатических величин: в начале XXI в. наибольшие темпы потепления сохраняются весной во всем регионе, а в зимний сезон на севере и юге наблюдаются разнонаправленные тенденции. Проведено сравнение полученных оценок с данными инструментальных наблюдений. Определено, что, несмотря на выявленные особенности в сезонном ходе величин трендов температуры почвы на разных глубинах, для описания изменчивости регионального климата предпочтительно использование данных реанализа. Установленные тенденции в колебании температуры почвы на глубинах в целом подобны изменениям температуры воздуха. Исследование температуры почвы в слоях 28–100 и 100–255 см, представленных в данных реанализа, показало, что, в отличие от ситуации 1979–1998 гг., в период 1999–2015 гг. эта величина уменьшается осенью и зимой и значимо растет в весенне-летний период с максимальной скоростью весной в арктической зоне территории. Наблюдаемые по данным реанализа изменения указывают на рост температуры в верхних слоях почвы в зоне многолетней мерзлоты, что, в свою очередь, может приводить к увеличению глубины слоя сезонного протаивания.*

Ключевые слова: температура воздуха, температура почвы, пространственно-временная изменчивость, региональный климат, зона многолетней мерзлоты.

E.V. KHARYUTKINA, S.V. LOGINOV

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
634055, Tomsk, pr. Akademicheskii, 10/3, Russia, kh\_ev@mail2000.ru, logsv13@imces.ru

### TRENDS IN CHANGES OF SOIL TEMPERATURE AT DEPTH IN WESTERN SIBERIA BASED ON REANALYSIS DATA

*Presented are the results from investigating spatio-temporal variability in surface air and soil temperatures at depth across the territory of Western Siberia at the end of the 20<sup>th</sup> — beginning of the 21<sup>st</sup> centuries. It is established that there were seasonal differences in temporal changes of climatic parameters in the north and in the south of the region: in the early 21<sup>st</sup> century, the highest rates of warming were observed in spring throughout the region, whereas the trends were oppositely directed during the winters season in the north and in the south. A comparison is made of the estimates obtained with instrumental observations. It was determined that, in spite of the identified differences in the seasonal behavior of the values of soil temperature trends at different depths, it is more appropriate to use reanalysis data in describing regional climate variability. The identified trends in soil temperature fluctuations at different depths are generally similar to air temperature changes. Examination of soil temperatures in the 28–100 and 100–255 cm layers from the reanalysis dataset showed that, in contrast to the situation for 1979–1998, the time interval 1999–2015 showed a decrease of this value in autumn and winter and its significant decrease during the spring-summer period, with the highest rate in spring in the arctic zone of the territory. It was found that the changes observed according to reanalysis data indicate a rise of temperature in upper soil layers, which, in turn, can lead to an increase in the depth of the layer of seasonal thawing.*

Keywords: air temperature, soil temperature, spatio-temporal variability, regional climate, permafrost zone.

#### ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным, приведенным в Пятом докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата [1], с 1880 по 2012 г. повышение температуры приземного воздуха на континентах и океанах составило 0,85 °С/10 лет. В последнее десятилетие характерной особенностью измене-

ния глобального климата стало значительное замедление темпов потепления, наблюдаемое с 2000 г. Один из характерных признаков происходящих глобальных климатических изменений — существенная пространственная неоднородность в распределении температуры. Региональной характеристикой этой тенденции выступает зимнее похолодание в средних широтах Евразии [2]. В частности, данное явление отчетливо фиксируется на территории Западной Сибири [3, 4]. При этом в высоких широтах отмечается интенсивное потепление климата: среднегодовые тренды температуры в Арктике в последние десятилетия более чем в два раза превышают среднеглобальные оценки [5].

В условиях происходящих колебаний климата большой практический интерес представляет исследование параметров зоны многолетней мерзлоты в изучаемом регионе, так как в первую очередь они влияют на инфраструктуру районов Крайнего Севера [6, 7]. Во-вторых, при таянии многолетней мерзлоты возможно увеличение концентрации парниковых газов и как следствие — изменение климата как на региональном, так и на глобальном уровнях [8].

Криолитозона охватывает 24 % площади суши Северного полушария (около 22,8 млн км<sup>2</sup>), в том числе более чем 11 млн км<sup>2</sup> в России, занимая около 65 % территории страны [9]. Для анализа термического состояния многолетнемерзлых пород (ММП) можно использовать несколько источников данных. Самыми продолжительными являются измерения температуры почвы на глубине до 3,2 м на метеостанциях [10, 11]. Учитываются данные геотермических наблюдений в скважинах различной глубины [12], а также результаты измерений мощности сезонно-талого слоя в рамках программы циркумполярного мониторинга деятельного слоя CALM [13]. При этом для оценки и прогноза характеристик ММП многие авторы используют данные моделирования [13, 14]. Однако при описании регионального климата локальные измерения могут быть нерепрезентативны из-за сильного влияния изменчивости неклиматических факторов на локальные параметры состояния ММП, а масштаб моделей теплового переноса не всегда позволяет воспроизводить особенности рельефа и типов почв [6, 15].

Основная цель данной работы — оценка пространственно-временной изменчивости температуры почвы на глубинах по данным реанализа на территории Западной Сибири в конце XX и начале XXI в. При этом особое внимание уделяется изменениям, происходящим в арктической зоне региона в период замедления темпов глобального потепления.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось для территории Западной Сибири (50–70° с. ш. и 60–90° в. д.) за период 1979–2015 гг. Для вычисления полей температуры воздуха и атмосферного давления использовались данные ежесуточных наблюдений центра распределения данных NOAA (<ftp://ftp.cdc.noaa.gov/pub/data/g sod/>). При расчетах температуры почвы на глубинах в слоях 28–100 и 100–255 см привлекалась база данных реанализа ERA-Interim (<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>). Для валидации оценок температуры почвы использовались сведения Мирового центра данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (<http://meteo.ru/data/164-soil-temperature>), которые приводились к слоям почвы, представленным в данных реанализа.

Выборочные функции распределения вероятности соответствующих метеорологических величин рассчитывались как для территории Западной Сибири, так и для ее полярной области (60–70° с. ш.). Функции распределения использовались для получения дескриптивных статистик, таких как среднее и медиана, среднее квадратическое отклонение/интерквартильный размах.

Измеренные на станции температуры в слоях почвы усреднялись в соответствии с глубиной уровней, используемых в данных реанализа. В качестве характеристики межгодовой изменчивости рассчитывались робастные оценки коэффициентов линейных трендов. Статистическая значимость полученных величин определялась двусторонним *t*-тестом нулевой гипотезы при уровне  $\alpha = 0,05$ . Так как метеорологические станции распределены неравномерно по территории Западной Сибири, измеренные величины температуры почвы будут зависеть от теплофизических свойств почв конкретной местности и меняющихся ландшафтных факторов, например от растительности [16]. Поэтому в качестве основного источника информации были выбраны данные реанализа, представленные в узлах регулярной сетки, где процесс их усвоения включает в себя процедуры моделирования переноса тепла. Погрешность данных реанализов оценивалась с помощью процедуры кросс-валидации (перекрестной проверки данных): метеовеличины реанализов интерполировались на географические координаты станций и сравнивались с данными наблюдений. Значения коэффициента линейной корреляции служили мерами расхождения двух временных рядов и использовались для получения оценок,

характеризующих качество согласованности и систематический сдвиг. По итоговым оценкам рассчитывались средние величины по множеству станций. Сглаживание данных проводилось с применением фильтра низких частот (ФНЧ) с шириной «окна» 10 лет.

### СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Происходящие климатические изменения на территории Западной Сибири выявлены путем исследования среднемесячных и сезонных полей температуры воздуха и атмосферного давления, а также полей коэффициентов их линейных трендов (далее — тренды) за 1976–2015 гг. Получена также межгодовая изменчивость этих величин. Подробное описание и анализ выявленных особенностей происходящих климатических изменений в начале XXI в. на изучаемой территории по данным инструментальных наблюдений представлены в [4, 17, 18]. Установлено, что для зимнего периода (декабрь–февраль) потепление сменилось похолоданием. При этом уменьшение величины тренда температуры сопровождается ростом давления в зимние месяцы. Стоит отметить, что тренды среднегодовых величин температуры остаются положительными, но в последнее десятилетие существенно уменьшаются. Проводилось также сравнение среднегодовых оценок температуры и давления, полученных по разным базам данных. Выявлено, что наилучшая согласованность данных инструментальных измерений (центр распределения NOAA) с данными реанализов (JRA-55, MERRA, ERA Interim) наблюдается для величины температуры. Расхождение по оценкам атмосферного давления более существенное, однако временной ход подобен. Это свидетельствует, что для выявления тенденций климатических величин можно использовать любой из рассмотренных источников данных.

Приведенные выше выводы получены в результате анализа усредненных оценок климатических величин для Западной Сибири. Однако на данной территории изменение скорости потепления происходит неравномерно и носит в основном очаговый характер [17]. Для более детального описания особенностей климата, а также для установления и понимания вызывающих их причин и механизмов в данной работе проведено исследование климатических изменений Западной Сибири с детализацией севера и юга большого региона.

С использованием реанализа ERA Interim выявлены особенности межгодовой изменчивости температуры и давления за каждый сезон для временного интервала 1979–2015 гг. В целом колебания в рядах давления находятся в противофазе с колебаниями температуры воздуха, но такое согласованное изменение температуры и давления наблюдается не для всей территории и не во все сезоны. Разные тенденции в изменении климатических величин на севере и юге региона наиболее отчетливо заметны зимой. В южной части региона (50–60° с. ш.) с начала XXI в. температура воздуха снижается, тогда как для арктической зоны (60–70° с. ш.) характерна очень слабая тенденция к увеличению. При этом изменение давления в этот период происходит практически синхронно на севере и на юге — наблюдается ярко выраженный рост. Полученные выводы подтверждаются и рассчитанными сезонными оценками трендов температуры и давления за два временных интервала: с 1979 по 1998 и с 1999 по 2015 г. В зимний сезон практически все оценки для температуры статистически незначимы ( $\alpha = 0,01$ ), за исключением отрицательных трендов на юге региона во втором временном интервале ( $-2,23$  °C/10 лет при  $\sigma = \pm 1,48$  °C/10 лет). На этой же территории наблюдается значимый рост величины давления ( $2,65$  гПа/10 лет при  $\sigma = \pm 1,77$  гПа/10 лет). В зимний сезон для арктической зоны существуют слабое увеличение температуры и более заметный рост давления, однако величины малы и статистически незначимы. Стоит отметить, что по темпам потепления лидирует весенний сезон. Тренды температуры остаются положительными и статистически значимыми при переходе от одного периода к другому на фоне статистически незначимых отрицательных трендов давления. При этом в арктической зоне региона наблюдаются максимальные оценки: за 1999–2015 гг. тренд температуры составил  $2,20$  °C/10 лет при  $\sigma = \pm 0,97$  °C/10 лет, а тренд давления —  $-0,99$  гПа/10 лет при  $\sigma = \pm 1,03$  гПа/10 лет. Значимых различий в тенденциях на севере и юге региона, как и в остальные сезоны, не выявлено.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что во временных изменениях климатических величин на севере и юге зафиксированы сезонные различия: в начале XXI в. наибольшие темпы потепления сохраняются весной на всей территории, тогда как в зимний сезон на севере и юге Западной Сибири наблюдаются разнонаправленные тенденции, в формировании которых, вероятно, участвуют разные механизмы. Соответственно, влияние климатических изменений на природные условия в этих регионах, особенно в зимние месяцы, будет различным.

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ НА ГЛУБИНАХ**

Так как ход температуры поверхностных слоев почвы в целом будет подобен ходу температуры приземного воздуха, исследование изменений температуры проводилось только для самых нижних слоев почвы, представленных в данных реанализа: 28–100 и 101–255 см. В первую очередь осуществлялся сравнительный анализ сезонных оценок температуры почвы на глубинах, рассчитанных по данным наблюдений и данным реанализа для территории Западной Сибири за два временных интервала: 1979–1998 и 1999–2015 гг. Сравнение проводилось по оценкам, усредненным в нижних слоях почвы. Полученные значения коэффициентов корреляции достаточно высоки и статистически значимы, при этом уменьшаются с глубиной. Во втором временном интервале значения коэффициентов корреляции выше (0,69–0,78), чем в первом (0,52–0,71), но диапазон изменения уменьшается. Что касается сезонного хода, то за 1979–1998 гг. наибольшее подобие отмечается в каждом слое осенью, а в 1999–2015 гг. в слое 101–255 см максимум смещается на весну. Несмотря на полученные сезонные различия, корреляционный анализ позволяет сделать вывод о достаточно хорошем согласии временных рядов температуры почвы на глубинах, рассчитанных по данным наблюдений и данным реанализа ERA Interim, что согласуется с [19].

В табл. 1 приведены среднесезонные оценки температуры почвы на глубинах, полученные по двум источникам данных. Сравнительный анализ показал, что оценки подобны по изменению их с глубиной во все сезоны, кроме зимнего. При этом температура почвы по данным реанализа в несколько раз превышает соответствующие значения по данным измерений. По данным реанализа подобных изменений от периода к периоду не выявлено.

Что касается сезонного хода трендов температуры почвы, то полученные из рассматриваемых источников оценки значительно различаются между собой (табл. 2). Во временном интервале 1979–1998 гг. практически во все сезоны наблюдаются положительные тренды температуры, по темпам потепления лидируют весна и лето, при этом для последнего по инструментальным данным отмечается более интенсивный прогрев, чем по данным реанализа. Эти результаты согласуются с оценками, полученными на глубине 320 см: тренд температуры почвы был положительным (от 0,022 до 0,034 °С/год за 1965–2007 гг.), что подтверждает общую концепцию повсеместного проявления современных тен-

Таблица 1

**Среднесезонные оценки температуры почвы (°С) на глубинах (в слоях), усредненные по территории Западной Сибири, по данным реанализа и инструментальным данным за разные временные интервалы**

Слой, см	Реанализ				Станции			
	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
1979–1998 гг.								
28–100	<b>–5,81</b>	–3,64	<b>10,33</b>	<b>4,13</b>	–1,27	0,61	<b>12,14</b>	<b>6,27</b>
100–255	0,17	–1,15	1,34	4,71	<b>1,97</b>	0,99	<b>7,58</b>	<b>7,48</b>
1999–2015 гг.								
28–100	<b>–6,04</b>	<b>–3,18</b>	<b>10,96</b>	<b>4,80</b>	–1,36	1,07	<b>13,15</b>	<b>6,71</b>
100–255	0,33	–1,13	1,92	<b>5,64</b>	<b>2,21</b>	1,25	<b>8,27</b>	<b>8,01</b>

Примечание. Здесь и в табл. 2 жирным шрифтом выделены значимые оценки ( $\alpha = 0,05$ ).

Таблица 2

**Среднесезонные оценки трендов температуры почвы (°С/10 лет) на глубинах (в слоях), усредненные по территории Западной Сибири, по данным реанализа и инструментальным данным за разные временные интервалы**

Слой, см	Реанализ				Станции			
	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
1979–1998 гг.								
28–100	0,19	<b>0,70</b>	<b>0,56</b>	0,21	–0,42	<b>0,61</b>	<b>1,15</b>	–0,30
100–255	0,23	<b>0,31</b>	<b>0,52</b>	0,70	0,18	<b>0,35</b>	0,38	0,25
1999–2015 гг.								
28–100	<b>–1,24</b>	<b>–0,50</b>	<b>–0,84</b>	0,17	–0,10	–0,47	–0,27	<b>0,62</b>
100–255	0,02	–0,24	<b>–1,20</b>	<b>–0,64</b>	0,12	–0,28	–0,36	0,25

денций деградации криолитозоны [20–22]. А для 1999–2015 гг. характерно обратное: по данным инструментальных наблюдений, в весенний и летний сезон наблюдаются хоть и статистически незначимые, но уже отрицательные тренды температуры почвы. Положительные тенденции можно отметить только осенью. По данным реанализа, во все сезоны фиксируются отрицательные тренды (зимой и летом они статистически значимые), преобладающие практически на всех рассматриваемых уровнях.

Найденные особенности в сезонном ходе оценок трендов температуры почвы на разных глубинах говорят, в первую очередь, о различной методике усвоения данных, используемой в данных инструментальных наблюдений и данных реанализа. Неизвестно, какие параметры учитывались в данных реанализа при расчете теплофизических свойств почвы. Что касается наблюдений, то та информация, которая представлена в свободном доступе, недостаточно полно отображает распределение температуры почвы в верхних ее слоях, что в дальнейшем сказывается на результатах интерполяции. К тому же точечные измерения температуры почвы на глубинах на метеостанциях могут быть нерепрезентативны в отношении многолетней мерзлоты, поскольку не отражают влияния меняющихся неклиматических (например, ландшафтных) факторов [16]. Поэтому, основываясь на результатах корреляционного анализа, можно сделать вывод, что использование данных реанализа в узлах равномерной сетки представляется целесообразным для решения задач, поставленных в рамках нашей статьи.

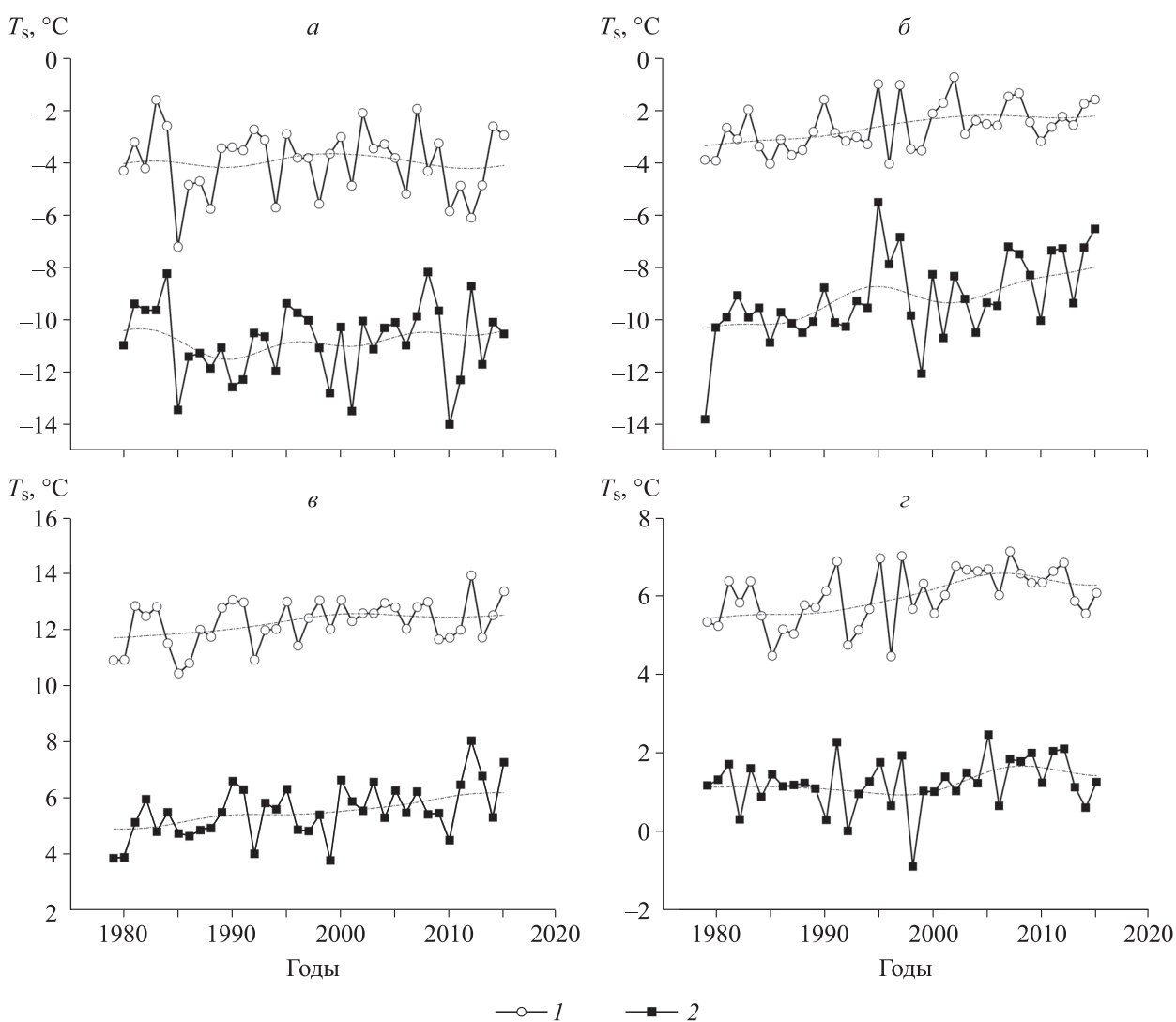


Рис. 1. Межгодовой ход сезонных оценок температуры почвы  $T_s$  в слое 28–100 см для северной и южной частей территории Западной Сибири по данным реанализа за 1979–2015 гг.

*a* — зима, *б* — весна, *в* — лето, *г* — осень. 1 — 50–60° с. ш., 2 — 60–70° с. ш. Штриховая линия — сглаживание по ФНЧ с шириной окна 10 лет.

Исходя из построенной межгодовой изменчивости сезонных оценок температуры почвы в слое 28–100 см отдельно для севера (арктической зоны) и юга территории Сибири (рис. 1) можно сказать, что в целом в начале XXI в. наблюдается уменьшение температуры почвы осенью и зимой и ее значимое увеличение в весенне-летний период. Причем максимальная величина тренда отмечается весной в арктической зоне территории (1,90 °C/10 лет при  $\sigma = \pm 0,60$  °C/10 лет). Указанные тенденции подобны описанным выше тенденциям изменения температуры воздуха. Однако если в летний сезон тренды температуры воздуха за 1999–2015 гг. практически близки к нулю, то для температуры почвы продолжается ее стабильный рост. Для слоя 100–255 см выявлены схожие закономерности, однако величины трендов меньше.

Что касается пространственного распределения трендов температуры почвы на глубинах, то в 1979–1998 гг. практически вся территория Западной Сибири находилась в области положительных значений (рис. 2). Только на юге региона можно выделить участок слабо отрицательных величин. Рост величины тренда происходит равномерно с юга на север. Картина существенно изменилась в 1999–2015 гг.: область отрицательных трендов теперь занимает всю южную и центральную части территории

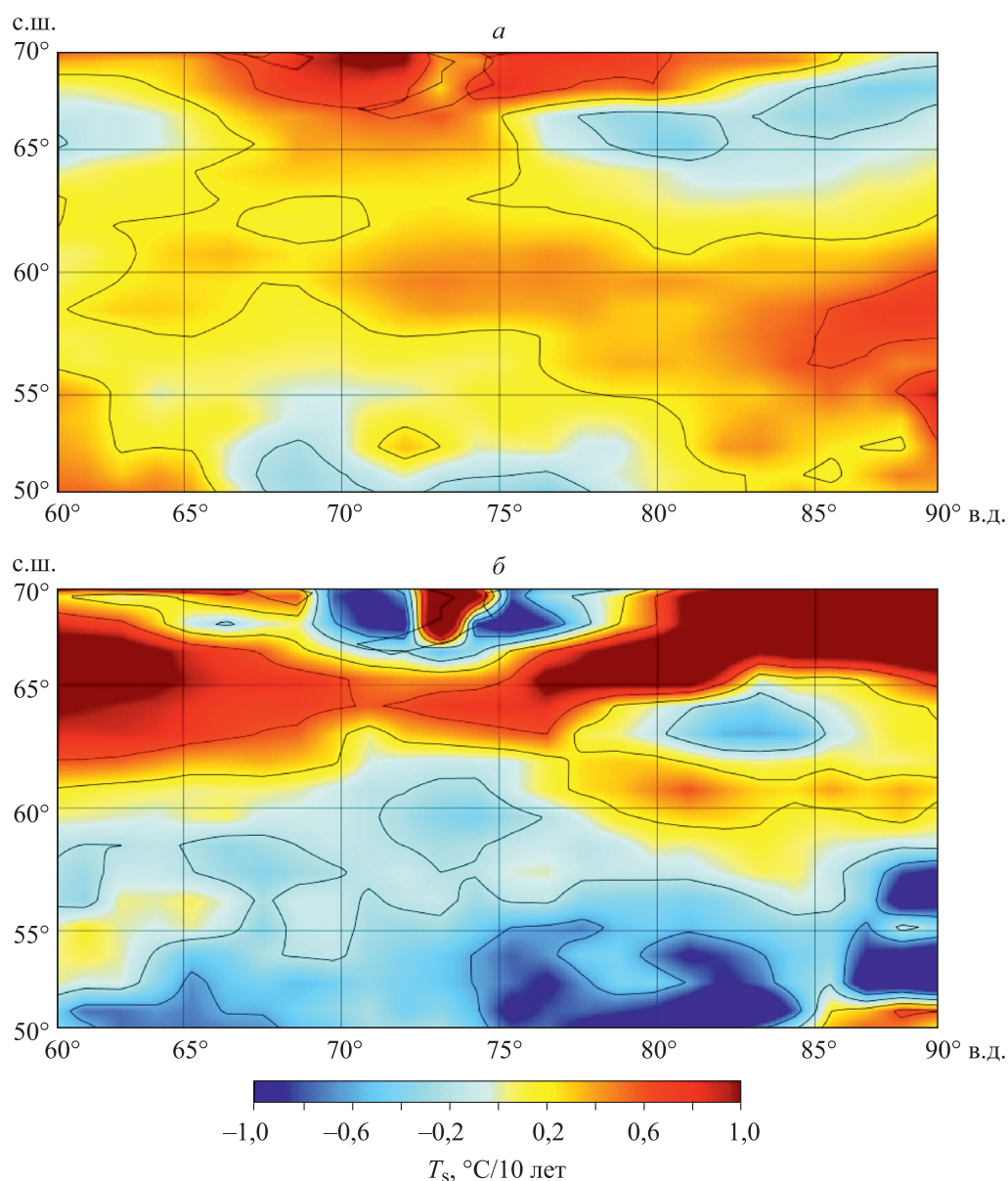


Рис. 2. Пространственное распределение среднегодовых оценок температуры почвы в слое 28–100 см для территории Западной Сибири по данным реанализа за 1979–1998 гг. (а) и 1999–2015 гг. (б).

Сибири, а на севере узкой полосой протянулась область положительных трендов, значения которых возросли примерно в 1,5 раза по сравнению с предыдущим периодом. Причем если раньше широкая полоса максимальных значений была сосредоточена вдоль северной границы территории, то сейчас она распадается на две части с центрами на северо-западе и северо-востоке. Такая ситуация может быть связана с изменением характеристик снежного покрова. Согласно [23], в зоне тундры формируется плотный и не очень глубокий (из-за выдувания ветром) снежный покров, который не обладает достаточно хорошими теплозащитными свойствами, поэтому именно для этой области характерна наибольшая чувствительность мерзлых пород к изменениям климата. К тому же, как отмечено в [24], тенденции изменения среднегодовой температуры почвы определяются преимущественно (до 50 %) колебаниями высоты снежного покрова, в то время как вклад вариаций температуры воздуха в общую изменчивость температуры ММП, как правило, по большей части не превышает 15 %. Поэтому в дальнейшем необходимо учитывать также и пространственно-временную изменчивость характеристик снежного покрова в рассматриваемом регионе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования по данным реанализа можно сделать вывод, что во временных изменениях температуры воздуха и атмосферного давления на севере и юге региона наблюдаются сезонные различия: в начале XXI в. наибольшие темпы потепления сохраняются весной на всей территории, тогда как в зимний сезон на севере и юге наблюдаются разнонаправленные тенденции, в формировании которых, вероятно, участвуют разные процессы. Полученные закономерности изменения температуры почвы на глубинах подобны ходу изменения температуры воздуха: в начале XXI в. происходит уменьшение температуры почвы осенью и зимой и ее значимое увеличение в весенне-летний период с максимальной скоростью весной в арктической зоне территории. Таким образом, наблюдаемые по данным реанализа изменения указывают на рост температуры в верхних слоях криолитозоны, что, в свою очередь, должно вызывать увеличение глубины сезонного протаивания. Такие тенденции описаны в работах [7, 22, 25], в которых результаты получены по инструментальным наблюдениям.

Несмотря на выявленные особенности в сезонном ходе оценок трендов температуры почвы на разных глубинах, определенных по инструментальным наблюдениям и по данным реанализа, представляется целесообразным использование последних для получения оценок изменчивости регионального климата.

Следует отметить, что в данной работе не проводился анализ дополнительных параметров, оказывающих влияние на изменчивость температуры почвы на глубинах, а следовательно, и на характеристики зоны мерзлоты: растительность и тип почвы на территории, атмосферные осадки, в частности высота снежного покрова. Поэтому при дальнейшем исследовании причинно-следственных связей наблюдаемых изменений необходимо учитывать также пространственное распределение и динамику указанных факторов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (16–35–60088 мол\_а\_дк).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **IPCC:** Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. — Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. — 1535 p.
2. **Cohen J.L., Furtado J.C., Barlow M., Alexeev V.A., Cherry J.E.** Asymmetric seasonal temperature trends // *Geophys. Res. Lett.* — 2012. — Vol. 39 [Электронный ресурс]. — <https://doi.org/10.1029/2011GL050582> (дата обращения 11.05.2017).
3. **Второй** оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: Общее резюме. — М.: Планета, 2014. — 58 с.
4. **Ипполитов И.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В., Морару Е.И.** Изменчивость климата азиатской территории России в период 1975–2012 гг. // *География и природ. ресурсы.* — 2014. — № 4. — С. 13–21.
5. **Доклад** об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 год. — М.: Росгидромет, 2015. — 107 с.

6. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России // Метеорология и гидрология. — 2002. — № 6. — С. 15–22.
7. Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. — 2012. — Т. 16, № 1. — С. 22–32.
8. Анисимов О.А., Лавров С.А., Ренева С.А. Эмиссия метана из многолетнемерзлых болот России в условиях изменения климата // Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем. — СПб.: Гидрометеиздат, 2005. — С. 124–142.
9. Brown J., Ferrians O.J., Heginbottom J.A., Melnikov E.S. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions. — CircumPacific Map Series, 1997.
10. Frauenfeld O.W., Zhang T., Barry R.G., Gilichinsky D. Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia // Journ. of Geophysical Research. — 2004. — Vol. 109, N D5. — P. D05101–D05112.
11. Шерстюков А.Б., Шерстюков Б.Г. Пространственные особенности и новые тенденции в изменениях термического состояния почвогрунтов и глубины их сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты // Метеорология и гидрология. — 2015. — № 2. — С. 5–12.
12. Сергеев Д.О., Ухова Ю.А., Станиловская Ю.В., Романовский В.Е. Температурный режим многолетнемерзлых толщ и сезонно-талого слоя в горах северного Забайкалья (возобновление стационарных наблюдений) // Криосфера Земли. — 2007. — Т. 11, № 2. — С. 19–26.
13. Shiklomanov N.I., Nelson F.E., Streletskiy D.A., Hinkel K.M., Brown J. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program: Data Collection, Management, and Dissemination Strategies // Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost. — Fairbanks: Institute of Northern Engineering, University of Alaska, 2008. — N 1. — P. 1647–1652.
14. Nelson F.E., Outcalt S.I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost // Arctic. Alp. Res. — 1987. — Vol. 19, N 3. — P. 279–288.
15. Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Мохов И.И. Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа) // Криосфера Земли. — 2007. — Т. 11, № 4. — С. 65–69.
16. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Моделирование воздействия антропогенного потепления на вечную мерзлоту: учет влияния растительности // Метеорология и гидрология. — 2004. — № 11. — С. 73–81.
17. Ипполитов И.И., Логинов С.В., Харюткина Е.В. География Сибири в начале XXI века. В 6 т. Т. 2: Природа, гл. 4: Климат: структура и динамика метеорологических величин на азиатской территории России за период 1975–2012 гг. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2015. — С. 117–137.
18. Харюткина Е.В., Ипполитов И.И., Логинов С.В. Роль радиационных и циркуляционных факторов в изменении климата Западной Сибири в конце XX и начале XXI веков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2016. — № 6. — С. 1–9.
19. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Климат в арктической зоне России: анализ современных изменений и модельные проекции на XXI век // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2016. — № 1. — С. 61–69.
20. Павлов А.В. Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли. — 2008. — Т. 12, № 3. — С. 22–27.
21. Шерстюков А.Б. Температура почвогрунтов России на глубинах до 320 см в условиях изменяющегося климата // Труды ВНИИГМИ-МЦД. — 2007. — Вып. 173. — С. 72–88.
22. Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Мясч Л.Т., Павлов А.В., Романовский В.А., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л., Шикломанов Н.И. Континентальная многолетняя мерзлота // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. — М.: Росгидромет, 2012. — Гл. 8. — С. 301–359.
23. Павлов А.В. Закономерности формирования криолитозоны при современных изменениях климата // Изв. АН СССР. Сер. геогр. — 1997. — № 4. — С. 61–75.
24. Шерстюков А.Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. — 2008. — Т. 12, № 1. — С. 78–86.
25. Москаленко Н.Г. Изменение температуры пород и растительности под влиянием меняющегося климата и техногенеза в Надымском районе Западной Сибири // Криосфера Земли. — 2009. — Т. 13, № 4. — С. 18–23.

*Поступила в редакцию 28.12.2016*

*После доработки 17.05.2017*

*Принята к публикации 27.12.2018*