

**МЕТЕОРОЛОГИЯ**

УДК 551.582.2 (571.65, 571.5, 571.651)

**Ю.В. Сточкоте, Л.Н. Василевская**  
**МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ПОЧВЫ НА КРАЙНЕМ**  
**СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РОССИИ**

По данным наблюдений в период 1966–2014 гг. за температурой воздуха и почвы на метеорологических станциях крайнего северо-востока России исследован температурный режим: рассчитаны характеристики распределения, выявлены и изучены экстремальные и значительные площадные аномальности температур (по критерию Н.А. Багрова) в центральные месяцы сезонов. Повторяемость значительных аномальных температурных полей наиболее высока весной; около 80% случаев пришлось на 80-е гг. прошлого столетия.

По корреляционным связям между температурными рядами произведено районирование территории со сходной динамикой температуры воздуха: зимой получено 4 района, а летом – 3. Выявлено устойчивое повышение температуры воздуха, особенно в переходные сезоны года. Летом оно не столь значительно и наблюдается на фоне увеличения площадной аномальности температуры воздуха. Для зимнего сезона характерно похолодание, хорошо выраженное в январе, наряду с этим происходит уменьшение числа значительных площадных аномалий температуры воздуха. Средняя по территории температура воздуха стабильно повышается во все месяцы, за исключением января; наибольшая скорость повышения температуры наблюдается в марте – апреле и в октябре – декабре. Обнаружено, что температура почвы также повышается, причем во все сезоны года. Исследованы корреляционная взаимосвязь между температурой почвы и воздуха.

Ключевые слова: изменение климата, температура воздуха, температура почвы, аномальность полей, тренды, корреляция.

**Y.V. Stochkote, L.N. Vasilevskaya**  
**EVALUATION OF LONG-TERM AIR AND SOIL TEMPERATURE CHANGES ON THE FAR**  
**NORTH-EAST OF RUSSIA**

The temperature regime is investigated according to observations of temperature data of soil and air in the meteorological stations of the Far Northeast of Russia in the period 1966–2014 years: distribution characteristics are calculated, extreme and significant areal temperature anomaly (by the N. A. Bagrov) in the central months of the season are identified and studied. Repeatability of extremely abnormal temperature fields is highest in the spring, about 80% of the cases occurred in the 80s of the last century.

Zoning with similar dynamics of air temperature is produced according the correlation between the temperature series: 4 areas in the winter and 3 in the summer are received. A steady increase in air temperature, especially in the transitional seasons is revealed. It is not so much in summer and observed on the background of increasing of areal air temperature abnormality. The winter season is characterized by cooling, which is well expressed in January. At the same time in January a reduction of significant areal air temperature anomalies is observed. The average territorial air temperature steadily increased in all months except January, the highest rate of temperature rise is observed in March - April and October - December. It is found that the soil temperature is also increase and besides in all seasons. The correlation relationship between the soil and the air temperature is investigated.

**Key words:** climate change, air temperature, soil temperature, anomaly fields, trends, correlation.

doi 10.17072/2079-7877-2016-2-84-96

Согласно «Информационному бюллетеню» [6] изменение температуры воздуха на крайнем северо-востоке России выделяется на общем фоне потепления на территории СНГ. Динамика климата крайнего северо-востока России за последние десятилетия недостаточно освещена в научных публикациях. Необходимы более глубокие знания о естественных региональных колебаниях климата на территориях, удаленных от активной хозяйственной деятельности. В настоящее время для России

получено неплохое соответствие модельных и наблюдаемых оценок по температуре воздуха, а на крайнем северо-востоке отмечается их значительное рассогласование. Во «Втором оценочном докладе Росгидромета» [3] представлены современные данные о состоянии и динамике мерзлоты в различных регионах и ландшафтах России. Многолетняя мерзлота рассматривается как криогенный ресурс современной экономики, который требует всестороннего изучения, использования и охраны. Повышение температуры воздуха, отмечаемое на территории России, несомненно, оказывает влияние на состояние грунтов [3; 5; 12; 13.]. Так, согласно [9] годовая температура самых верхних горизонтов мерзлых пород повышается вслед за потеплением климата. Процессы деградации многолетней мерзлоты на территории крайнего северо-востока России оказывают негативное влияние на объекты ЖКХ, все наземные транспортные коммуникации и линии электропередач от Билибинской атомной станции. В связи с этим необходимо изучение термических характеристик почвогрунтов во взаимосвязи с другими факторами окружающей среды. Научным экспериментом по сохранению экологической системы и воссозданию плодородия почв в низовьях Колымы является создание сотрудниками Тихоокеанского института географии ДВО РАН Плейстоценового парка, который находится на исследуемой территории.

По административному делению Российской Федерации изучаемая территория включает северо-восток Якутии (Саха), Магаданскую область, крайний север Камчатского края (бывший Корякский АО) и Чукотский АО. На востоке и севере территория омывается Беринговым, Чукотским и Восточно-Сибирским морями, а на юге – Охотским. Самым теплым является Берингово море. Эти моря оказывают согревающее влияние на климат прибрежных районов. На северо-востоке Чукотский полуостров отделен от Аляски сравнительно нешироким (86 км) Беринговым проливом. Крайний северо-восток России – это территория с очень сложным рельефом – от горных хребтов с вершинами высотой более 2500 м до низин, слабо приподнятых над уровнем моря. Преобладающими являются горы средней высоты и плоскогорья. Равнины и низменности, располагающиеся в междугорных депрессиях или в узкой прибрежной полосе, занимают очень незначительное пространство. Горные хребты оказывают большое влияние на формирование климата. Их наличием объясняется резкая континентальность климата во внутренних районах территории [10].

Большая часть территории расположена за полярным кругом. Здесь же, в п. Черском (68°44'N, 161°23'E), находятся одна из крупнейших исследовательских арктических станций в мире – Северо-Восточная научная станция (Тихоокеанского института географии ДВО РАН) и Плейстоценовый парк. Сотрудники станции занимаются научными исследованиями, в том числе вопросами мерзлотоведения и изменения климата [15, 16, 18, 19]. Пристальное внимание уделяется процессам таяния вечной мерзлоты на фоне глобального потепления [4]. Метеорологическая станция Островное, данные которой используются в настоящей работе, располагается недалеко от п. Черский.

Многолетняя мерзлота на исследуемой территории начинается неглубоко от поверхности, встречаются сезонно-талые грунты. Исключение составляют отдельные участки узкой полосы побережья Охотского и Берингова морей. Распределение типов почв подчинено вертикальной и широтной зональности. Почвы горных территорий, занимающие 75 %, характеризуются сочетанием горно-тундровых почв каменистых россыпей. В зоне горной тайги преобладают горные подзолистые, подбурые, мерзлотно-таежные почвы. Болотно-мерзлотные почвы встречаются по всей территории, часто в сочетании и комплексах с другими почвами. Они формируются в условиях избыточного увлажнения на пониженных элементах рельефа [12].

Целью настоящей работы явилось исследование особенностей режима и динамики температуры воздуха и почвы на крайнем северо-востоке России. В связи с этим решались следующие задачи: статистический анализ временных рядов температуры воздуха и почвы, а также аномальности полей температуры воздуха; определение корреляционной взаимосвязи температуры почвы и воздуха; оценка трендов многолетних изменений температуры воздуха и почвы в календарные сезоны.

### Материалы и методика исследования

Исходной метеорологической информацией явились среднемесячные временные ряды приземной температуры воздуха за 1966–2014 гг. на 26 репрезентативных метеорологических станциях Чукотского АО, Магаданской области и Восточной Якутии (рис. 1), представленные на сайте ФГБУ «ВНИИГМИ МЦД». Большая часть станций (17 станций) расположена на побережье, а остальные 9 станций – в континентальной части региона. Треть станций находится на высоте менее 10 м над уровнем моря, половина станций – на высоте менее 100 м, и лишь 4 станции являются горными (табл. 1).

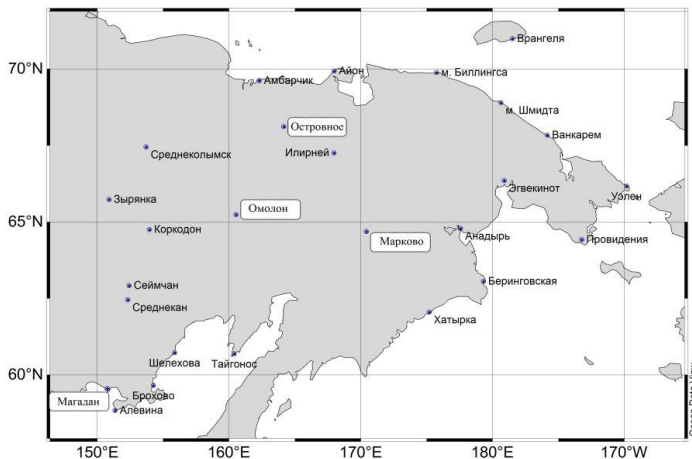


Рис. 1. Карта-схема расположения метеорологических станций  
(в рамках выделены станции, на которых проводятся наблюдения за температурой почвы)

Таблица 1

Высота (h) над уровнем моря метеорологических станций

Станция	h, м	Станция	h, м	Станция	h, м
Врангеля	5	Эвкекино	26	Сеймчан	205
Айон	16	Уэлен	3	Среднекан	260
м. Биллингса	3	Зырянка	43	Хатырка	13
Амбарчик	23	<b>ОМОЛОН</b>	264	Шелихова	34
м. Шмидта	4	Корколдон	101	Тайгонос	30
Ванкарем	5	<b>МАРКОВО</b>	26	Брехово	5
<b>ОСТРОВНОЕ</b>	94	Анадырь	61	<b>МАГАДАН</b>	116
Среднеколымск	21	Провидения	16	Алевина	64
Илирней	353	Беринговская	82	-	-

Примечание: выделены станции, проводящие наблюдения за температурой почвы.

Наблюдения за температурой почвы проводятся только в Островном, Омолоне, Маркове и Магадане на глубинах 20, 40, 60, 80, 120, 160 и 240 см. Информационной базой о температуре почвы явились материалы разных периодов наблюдений: в Магадане и Маркове за 1963–2011 гг., в Островном за 1977–2011 гг. и в Омолоне за 1988–2011 гг.

Для анализа многолетних изменений температуры воздуха и почвы рассматривались временные ряды годовых и месячных значений в центральные месяцы сезонов (январь, апрель, июль, октябрь). Чтобы исключить возможную климатологическую неоднородность метеорологических рядов, за начало периода исследования нами был взят 1966 г., когда на метеорологической сети взамен четырехсрочных стали проводиться восьмисрочные наблюдения.

Все исходные ряды подвергались статистической обработке: рассчитывались стандартные статистические показатели, оценивалась близость эмпирических распределений к нормальному закону. Оценивание проводилось по различным методам: близости трех статистик (среднее, медиана и мода), «одного-трех» сигм [7]; по критерию  $C = P/\sigma$ , где  $P$  – размах колебаний,  $\sigma$  – стандартное отклонение ряда [8].

По критерию Н.А. Багрова определена аномальность полей температуры воздуха [1]. Территориальное распределение для случаев экстремальной аномальности анализировалось по данным NCEP/NCAR реанализа аномалий температуры воздуха в узлах регулярной географической сетки с шагом по широте и долготе 2,5 на 2,5°.

Для определения районов со сходными тенденциями изменения январской и июльской температур воздуха, выявления взаимосвязи температуры почвы и воздуха привлекался корреляционный анализ (рассчитывались коэффициенты парной корреляции Браве-Пирсона).

По межгодовым изменениям средней месячной температуры воздуха, почвы и критерия Багрова определены коэффициенты наклона ( $a$ ) линейных трендов; значимость этих трендов оценивалась по коэффициенту детерминации ( $R^2$ ) на уровне доверительной вероятности 95 %. Пространственные особенности распределения скоростей изменения температуры воздуха анализировались с помощью карт, построенных в пакете «Surfer» с использованием метода интерполяции «Kriging».

### Результаты и их обсуждение

**Температура воздуха.** Многолетняя среднегодовая температура воздуха на изучаемой территории изменяется в пределах от  $-13^{\circ}\text{C}$  (север территории и континентальная часть) до  $-1,9^{\circ}\text{C}$  (восточное и южное побережья). Самые высокие температуры в годовом ходе наблюдаются в июле, за исключением северо-восточного побережья Охотского моря, где максимум сдвинут на август. На побережье многолетняя температура самого тёплого месяца колеблется от  $+3,4^{\circ}\text{C}$  (м. Биллингса, север) до  $+12,3^{\circ}\text{C}$  (Брохово, юг), а в континентальной части – от  $+12,4^{\circ}\text{C}$  (Илирней, север) до  $+15,9^{\circ}\text{C}$  (Сеймчан, Среднекан, юг).

Самым холодным месяцем на северном и восточном побережье является февраль, а на южном – январь. На северном побережье многолетняя температура этого месяца изменяется от  $-30^{\circ}\text{C}$  (м. Амбарчик) до  $-24,6^{\circ}\text{C}$  (о. Врангеля); на северо-восточном побережье – от  $-22,3^{\circ}\text{C}$  (Анадырь) до  $-15,3^{\circ}\text{C}$  (б. Провидения); на южном побережье – от  $-19,7^{\circ}\text{C}$  (Брохово) до  $-12,7^{\circ}\text{C}$  (м. Алевина). В континентальной части самый холодный месяц – это январь, многолетняя температура которого варьирует от  $-37,7^{\circ}\text{C}$  (Коркодон, запад) до  $-25,4^{\circ}\text{C}$  (Марково, восток).

По материалам наблюдений 26 станций был проведен статистический анализ временных рядов среднемесячной температуры воздуха. Стандартное отклонение ( $\sigma$ ) в теплый период составляет от 1,6 до  $2,7^{\circ}\text{C}$ , а в холодный период этот показатель несколько больше – от 2,3 до  $4,3^{\circ}\text{C}$  [17]. Наиболее стабильны температуры воздуха от года к году в холодный период – коэффициент вариации ( $C_v$ ) равен 10–40%, а довольно изменчивы – в летние месяцы ( $C_v$  зачастую превышает 100%). В качестве примера в табл. 2 приведены некоторые статистические характеристики температуры воздуха в центральные месяцы сезонов на станции Омолон (выбор этой станции обусловлен ее центральным положением на изучаемой территории).

Исследуемые эмпирические выборки среднемесячной температуры воздуха близки к нормальному закону распределения, что подтверждается:

- 1) сходством трех статистик ( $X_{cp.}$ ,  $M_e$ ,  $M_o$  – табл.3) в 80% рядов;
- 2) выполнением закона «одного-трех сигм» – в 70% рядов;
- 3) нахождением критерия «С» в критических границах (3,95–5,50) на 95%-ном уровне надежности практически во всех рядах.

Таблица 2

Статистические характеристики температуры воздуха на станции Омолон в центральные месяцы сезонов

Характеристики температуры воздуха	Месяц				Год
	январь	апрель	июль	октябрь	
$X_{cp.}$	-37,0	-13,8	14,4	-10,8	-11,9
$\delta$	4,7	3,0	1,8	2,9	1,3
$M_e$	-37,5	-13,9	14,4	-10,8	-12,0
$M_o$	-41,0	-13,2	11,7	-13,6	-5,0
$A$	0,9	0,3	0,5	0,1	0,6
$E$	0,8	-0,4	0,6	-0,5	0,0
$C_v$	-0,1	-0,2	0,1	-0,3	-0,1

Примечание:  $M_e$  – медиана,  $M_o$  – мода,  $A$  – коэффициент асимметрии,  $E$  – коэффициент эксцесса.

Таблица 3

Некоторые статистические характеристики температуры воздуха на станциях, отражающих температурный режим отдельных районов

Станция	Январь			Июль			Год		
	Х <sub>ср.</sub>	М <sub>е</sub>	М <sub>о</sub>	Х <sub>ср.</sub>	М <sub>е</sub>	М <sub>о</sub>	Х <sub>ср.</sub>	М <sub>е</sub>	М <sub>о</sub>
Амбарчик	-29,7	-29,5	-25,9	7,2	7,2	5,2	-12,2	-12,3	-12,7
Эвекинот	-17,8	-18,1	-17,1	10,0	10,0	9,0	-5,6	-5,7	-5,0
Зырянка	-36,4	-36,4	-35,8	16,1	15,9	15,7	-10,8	-10,8	-12,4
Магадан	-16,6	-16,5	-22,9	11,5	11,4	11,5	-3,0	-3,1	-3,1

**Аномальность полей приземной температуры.** Для выявления интегральной аномальности температуры воздуха в центральные месяцы сезонов рассчитывался критерий Багрова ( $K$ ), представляющий собой среднее по территории значение нормированной аномалии без учета ее знака [1]. Необходимо подчеркнуть, что нормирование аномалий проводилось относительно стандартного отклонения за базовый период с 1981 по 2010 г.

В табл. 4 помещены годы, в которые наблюдались значительные аномалии температуры воздуха в центральные месяцы сезонов. Отметим, что под значительными аномалиями температурных полей нами была принята величина критерия  $K \geq 2,0$ . Таковыми оказались по 4 случая в январе, июле и октябре. Апрель отличается наиболее частыми «выбросами» в многолетнем ходе критерия  $K$ : 13 из 49 лет являются значительно аномальными. Причем около 77% (10 лет из 13) пришлось на 80-е гг. прошлого столетия.

Пространственное распределение аномалий температуры в экстремальные годы (по критерию  $K$ ) представлены на рис.3. Следует отметить, что аномалии по данным NCEP/NCAR реанализа рассчитаны относительно базового периода 1981– 2010 гг.

Таблица 4

Годы со значительными аномалиями температуры воздуха

Месяц	Критерий Багрова $\geq 2,0$
Январь	<u>1969, 1973, 1989, 1996</u>
Апрель	<u>1990, 1987, 1988, 1989, 2013, 1986, 1985, 1980, 1981, 2006, 1979, 1983, 2007</u>
Июль	<u>2010, 1991, 2007, 2001</u>
Октябрь	<u>2003, 2012, 1977, 2004</u>
Год	<u>2007, 2014, 2003</u>

Примечание: подчеркиванием выделены аномально теплые, курсивом – аномально холодные годы.

В январе 1969 г. на большей части территории наблюдались положительные аномалии (рис. 2), очаг которых (+12°C) располагался на востоке. Характер распределения аномалий января 1973 г. значительно отличался от января 1969 г.: вся территория была занята отрицательными аномалиями, наибольшие из которых (–6°C) сосредоточены в центральной и юго-западной частях. Январь 1989 г. был также аномально холодным, очаги располагались в центре (–5°C) и на востоке территории (–6°C). Январь 1996 г. был аномально теплым, наибольшие аномалии (+8°C) отмечались на юго-западе и на востоке.

В 13 апрелях из 49 критерий  $K$  превышал величину 2: в 1981, 1986, 1990, 2007 и 2013 гг. на большей части территории преобладали температуры выше нормы, а в 1979, 1980, 1983, 1985, 1987, 1988, 1989, 2006 гг. – ниже нормы (табл. 4). Следует отметить, что апрели 1985 и 1988 гг. характеризуются неоднородным полем аномалий: незначительные очаги положительных значений располагались в 1985 г. на юго-западе, а в 1988 г. – на северо-востоке и северо-западе.

Все июли, значительные по критерию Багрова, были в целом аномально теплыми (табл. 4) и только различались по характеру распределения самих аномалий, так, в 2010 г. наиболее значительные аномалии (+8°C) наблюдались в центральной части, в 1991 г. и в 2001 г. (+4°C) – на северо-западе территории, а в 2007 г. (+4°C) – на северном побережье. Для июлей двух последних лет в отдельных районах отмечались незначительные отрицательные аномалии (–1... –2°C): в 2007 г. на крайнем юго-западе и в 2001 г. на крайнем северо-востоке.

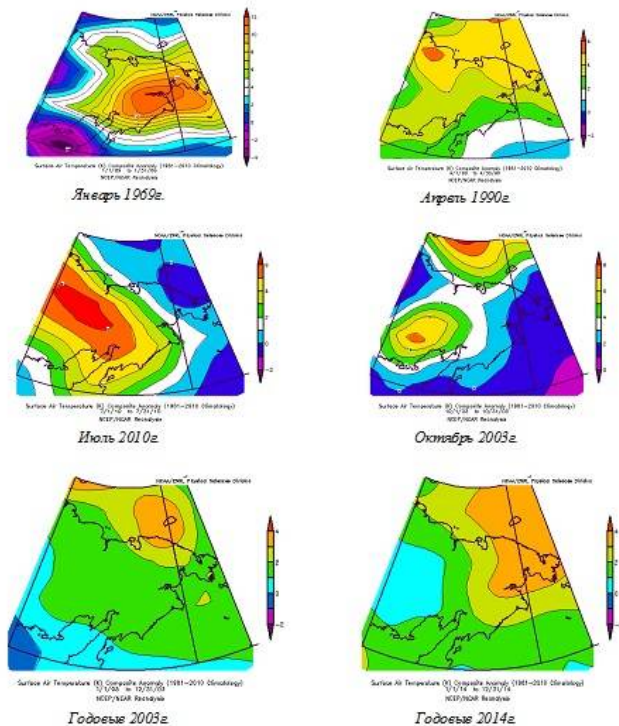


Рис. 2. Пространственное распределение аномалий среднегодовой и среднемесячной температуры воздуха в годы экстремальной аномальности (по критерию Багрова)

Октябри, значительные по критерию  $K$ , были как аномально теплыми (2003 и 2012 гг.), так и неоднородными по распределению положительных и отрицательных аномалий (1977 и 2004 гг.). В 2003 г. аномалии по всей территории превышали  $+3^{\circ}\text{C}$ , очаг ( $+8^{\circ}\text{C}$ ) располагался в верхнем и среднем течении Колымы (рис. 3). Пространственное распределение температурных аномалий октября 2012 г. схоже с 2003 г., но с менее значительными величинами – от  $+2$  до  $+5^{\circ}\text{C}$ . В октябре 1977 г. положительные и отрицательные аномалии располагались зонально: положительные (до  $+2^{\circ}\text{C}$ ) – вдоль северного побережья с максимумом ( $+4^{\circ}\text{C}$ ) на северо-востоке; отрицательные – на остальной территории ( $-1...-4^{\circ}\text{C}$  с наибольшими значениями  $-5...-6^{\circ}\text{C}$  в центральной части). Октябрь 2004 г. имеет, напротив, меридиональное распределение положительных и отрицательных аномалий: на западе – отрицательные ( $-1...-6^{\circ}\text{C}$ ), а на востоке – положительные аномалии ( $+1...+4^{\circ}\text{C}$ ).

Выявлено всего 3 года, для которых средняя площадная аномальность годовой температуры была значительной (табл. 4). Эти годы приходится на текущее столетие. Для них характерны только положительные аномалии от 1 до  $3^{\circ}\text{C}$ , очаг которых располагается над акваторией Восточно-Сибирского и Чукотского морей (рис. 3).

Подводя итог анализу значительной аномальности температурных полей, можно заключить, что летом и в среднем за год она была только положительной и пришлась на текущее столетие. Во время значительно холодных зим аномальность, как правило, четче проявляется в центральной части, а во время аномально теплых – на востоке территории. Весной распределение аномалий по крайнему северо-востоку России более или менее равномерное как для холодных, так и для теплых сезонов. Весны были аномально холодными в основном в 1980-е гг., а значительные положительные аномалии

пришлись на период после 1990 г. В отличие от других сезонов осень может быть аномально теплой в одной части территории и аномально холодной – в другой. Следует отметить, что во время аномально теплой осени максимумы аномалий располагаются в верхнем и среднем течении Колымы.

Аномальность температурных полей, превышающая естественную изменчивость, оценивалась по величине критерия  $K \geq 1$ . Такими аномальными полями в период 1966–2014 гг. оказались: в январе – 15, в апреле – 32, в июле – 13, в октябре – 23 случая, а за год – 19 случаев. Причем в последнее 25-летие на аномальности, превышающие естественную изменчивость, приходится 84% среднегодовых, 33% январских, 53% апрельских, 77% июльских и 57% октябрьских температурных полей. Таким образом, повторяемость этих аномальных полей за последнее 25-летие увеличилась в летний сезон и в целом за год. Исследование динамики критерия  $K$  подтверждает полученные выводы. Так, в многолетнем ходе  $K$  для среднегодовой и летней температуры выявлен устойчивый положительный, а для январской – устойчивый отрицательный линейный тренд.

**Районирование.** Для того чтобы выявить районы с однотипной направленностью изменения температуры воздуха зимой и летом, был применен корреляционный анализ. В основу районирования положена тесная корреляционная связь между январскими и июльскими температурными рядами на соседних станциях. Критерием связности между исследуемыми рядами нами была положена величина коэффициента корреляции не менее 0,7. Зимой, таким образом, были выделены следующие однотипные районы: северный (I), северо-восточный (II), бассейн Колымы (III), северо-восточное побережье Охотского моря (IV) (рис. 3).

Отметим, что корреляционные связи между соседними станциями внутри районов довольно тесные ( $r = 0,8–0,9$ ). Станции Амбарчик, Эгвекинот, Зырянка и Магадан, представленные в табл. 3, являются «ядром» каждого зимнего района. Летом статистическое сходство температурных рядов наблюдается в трех районах – бассейне Колымы (I), северо-восточном районе (II) и на северо-восточном побережье Охотского моря (III) (рис. 3). По сравнению с зимой корреляционные связи летом менее тесные ( $r = 0,7–0,9$ ) [11].

**Динамика температуры воздуха.** В январе на севере (I район) и северо-востоке (II район) наблюдается устойчивый отрицательный тренд, скорость понижения температуры воздуха составляет от 0,41 до 0,67 °C/10 лет (рис. 4). В бассейне Колымы (III район) температура воздуха понижается с меньшей скоростью от 0,01 до 0,06 °C/10 лет. На северо-восточном побережье Охотского моря (IV район) отмечается отрицательная тенденция, однако на западном побережье залива Шелихова наблюдается, наоборот, незначительное потепление. Итак, выявленное в январе похолодание на крайнем северо-востоке России статистически значимо только в прибрежных районах (рис. 4). Пространственное распределение интенсивности похолодания в других месяцах зимы существенно отличается от январской картины. Отрицательные тенденции располагаются небольшими очагами: в декабре это меридионально ориентированная зона от 160° до 170° в.д. (западная часть II и восточная III районов), а в феврале – широтно ориентированная по югу района зона, распространяющаяся меридионально до 67° с.ш. (IV район и юг II района).

Весной, в отличие от зимы, наблюдается потепление, выраженное во все месяцы. Закономерно, что интенсивность потепления увеличивается с юго-востока на северо-запад от 0,1–0,3 до 0,7–0,9 °C/10 лет. Однако на половине станций обнаружены положительные тренды статистически незначимы.

Устойчивое повышение температуры воздуха характерно для всей территории и всего летнего сезона. Темпы повышения составляют от 0,3 до 0,6 °C/10. Очаг наибольшего потепления располагается на севере и в центральной части территории (бассейн р. Колымы – II район).

В осенний сезон почти на всех станциях в межгодовых колебаниях температуры воздуха также обнаружен рост (от 0,2 до 0,6 °C/10 лет), наиболее выраженный на северо-востоке региона (0,7 °C/10 лет). Причем в сентябре–октябре скорость потепления увеличивается с юго-запада на северо-восток. А вот в ноябре картина пространственного распределения очагов потепления больше походит на декабрьскую.

Среднегодовая температура воздуха на крайнем северо-востоке России, несмотря на некоторое понижение в зимний сезон, все же повышается в среднем на 0,1–0,4 °C/10 лет, причем максимальная скорость роста температуры воздуха отмечается на западе и северо-востоке территории (0,3–0,4 °C/10 лет).

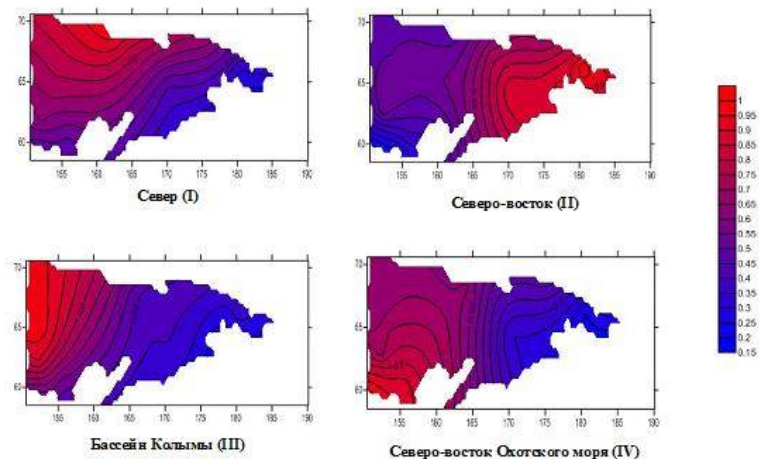


Рис. 3. Районы с однотипной направленностью изменения температуры воздуха зимой (распределение коэффициентов парной корреляции): красным цветом выделены районы с тесными статистическими связями ( $r \geq 0,7$ )

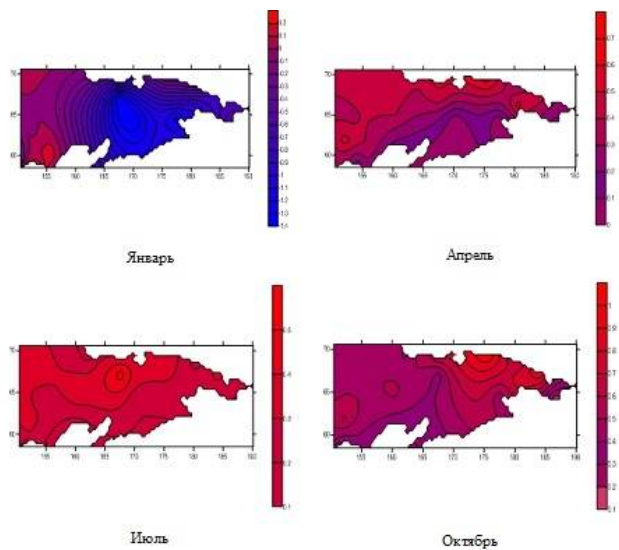


Рис. 4. Скорости изменения температуры воздуха в центральные месяцы календарных сезонов – °C/10 лет

Осредненная по территории температура воздуха тесно связана с температурой на большинстве рассматриваемых станций, что позволило использовать ее в качестве показателя, отражающего температурный режим исследуемого района. Анализ межгодовых колебаний средней по территории



температуры воздуха показал, что положительная тенденция характерна для всех месяцев, кроме января, в котором наблюдается статистически незначимое похолодание (табл. 5). Величины коэффициентов детерминации линейных трендов в большинстве случаев значимы ( $R^2 > 0,078$ ), что указывает на устойчивость выявленного потепления. Наибольшая скорость повышения температуры наблюдается в марте–апреле и в октябре–декабре. Аналогичный характер повышения температуры воздуха отмечен и в соседнем регионе – на Камчатке [14].

Таблица 5  
Статистические характеристики скорости изменения средней по территории температуры воздуха

Характеристики	Месяц												Год
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	Ноябрь	декабрь	
$a$	-0,46	0,53	0,66	0,69	0,38	0,27	0,33	0,16	0,18	0,63	1,07	0,62	0,36
$R^2$	0,05	0,043	0,131	0,237	0,171	0,199	0,212	0,052	0,060	0,301	0,277	0,101	0,405
$m(a)$	0,029	0,031	0,027	0,020	0,014	0,011	0,013	0,013	0,012	0,016	0,025	0,028	0,010

Примечание:  $a$  – угол наклона;  $m(a)$  – ошибка угла наклона,  $R^2$  – коэффициент детерминации

**Температура почвы.** Ранее нами было показано, что «... средняя годовая температура почвы в верхнем слое криолитозоны меняется с севера на юг по территории незначительно: от  $-3,2$  до  $0,3^\circ\text{C}$  на глубине 20 см и от  $-3,5$  до  $1,3^\circ\text{C}$  – на глубине 160 см. Годовой ход температуры почвы на разных глубинах четко выражен и имеет простой вид: максимальный прогрев происходит в июле–сентябре, а охлаждение – в январе–марте в зависимости от местоположения станции. Годовые амплитуды температуры с глубиной резко уменьшаются: от  $17\text{--}25^\circ\text{C}$  в верхней части до  $8\text{--}12^\circ\text{C}$  – в нижней части исследуемого слоя» [2].

На крайнем северо-востоке России наблюдается устойчивое повышение температуры почвогрунтов (до глубины 160 см), которое проявляется во все сезоны года. Лишь на юге (ст. Магадан) наибольшее повышение температуры почвы отмечается зимой, возможно, это связано с увеличением высоты снежного покрова. Соответственно оттаивание почв сдвигается на более ранние сроки со скоростью 2–3 дня/за 10 лет, а замерзание на значительно более поздние – от 3 до 13 дней/за 10 лет в зависимости от глубины и района исследуемой территории. В результате этого наблюдается устойчивая тенденция увеличения продолжительности сезонного оттаивания на 3–15 дней/за 10 лет [2].

**Взаимосвязь между температурой почвы и воздуха** оценивалась путем нахождения корреляционных зависимостей между этими метеопараметрами. На севере территории (ст. Островное) с мая по декабрь температуры воздуха и почвы на глубине 60 см взаимосвязаны (табл. 6). Наиболее тесная связь отмечается в мае–августе (она значима даже на 1%-ном уровне). Отметим наличие асинхронных связей со сдвигом 1 месяц с апреля по август (температура почвы следует за температурой воздуха). Тепло, поступившее в мае–июле от атмосферы к почве, сохраняется в ней вплоть до октября. Примечательно, что температура воздуха в мае определяет среднегодовую температуру почвы на глубине 60 см ( $r=0,64$ ). На глубине 120 см синхронные связи прослеживаются в марте–сентябре; здесь также, как на вышележащем горизонте, тепло, поступившее от атмосферы в мае–августе, сохраняется до сентября. В отличие от глубины 60 см на этом горизонте выявлена корреляционная зависимость между температурой воздуха в марте и температурой почвы в апреле–сентябре. На горизонте 240 см тесная синхронная корреляционная зависимость между температурами выявлена только в мае и августе–ноябре. В эти же месяцы температура воздуха определяет температуру почвы последующего месяца.

Таблица 6

Коэффициенты парной корреляции между приземной температурой воздуха и температурой почвы на глубине 80 см

Месяц	Станция			
	Островное*	Омолон	Марково	Магадан
Январь	-0,13	0,05	0,09	<b>0,39</b>
Февраль	-0,14	0,04	0,04	0,24
Март	0,27	0,40	0,05	<b>0,39</b>
Апрель	0,45	<b>0,46</b>	-0,09	<b>0,62</b>
Май	<b>0,76</b>	<b>0,53</b>	0,41	<b>0,46</b>
Июнь	<b>0,80</b>	0,02	<b>0,37</b>	<b>0,44</b>
Июль	<b>0,75</b>	0,40	0,25	<b>0,55</b>
Август	<b>0,85</b>	<b>0,50</b>	<b>0,48</b>	<b>0,66</b>
Сентябрь	<b>0,50</b>	<b>0,57</b>	<b>0,57</b>	<b>0,69</b>
Октябрь	0,46	0,13	0,14	<b>0,46</b>
Ноябрь	0,47	-0,18	0,27	<b>0,42</b>
Декабрь	0,40	0,23	0,07	<b>0,39</b>
Год	0,42	<b>0,52</b>	<b>0,60</b>	<b>0,63</b>

Примечание: жирным шрифтом выделены значимые  $r$  на 95%-ном уровне значимости; \* – глубина 60 см

В континентальной части региона (станции Омолон и Марково) на глубине 20 см синхронные связи значимы с мая по сентябрь, асинхронные – с апреля по сентябрь (сдвиг 1 месяц), т.е. температура почвы зависит от температуры воздуха в предшествующий месяц. Температура воздуха в мае–июне определяет температуру почвы до октября (сдвиг 1–5 месяцев). В свою очередь, температура воздуха в октябре зависит от прогрева почвы с мая по сентябрь. На глубине 80 см весной (апрель–май) и летом (июль–август) прослеживается тесная корреляционная связь между температурой почвы и воздуха. Температура воздуха определяет температуру почвы через месяц весной и летом. Примечательно, что температура воздуха в марте тесно связана с температурой почвы в мае–сентябре (сдвиг 2–6 месяцев); температура воздуха в мае определяет температуру почвы до сентября (сдвиг 2–4 месяца). Выявлена зависимость температуры воздуха в октябре от накопленного почвой тепла в предшествующие 1–5 месяцев. На глубине 160 см тесные синхронные связи прослеживаются между температурой воздуха и почвы летом и осенью (с июля по октябрь). В этот же период имеется асинхронная зависимость температуры почвы от температуры воздуха со сдвигом в один месяц. Температура воздуха в июле – октябре влияет на температуру почвы в последующие 1–3 месяца. Температура воздуха в мае определяет температуру почвы до сентября (сдвиг 1–4 месяца). Температура воздуха в октябре зависит от накопленного почвой тепла в предшествующие 1–3 месяца.

На юге в самом верхнем слое почвы (20 см) выявлены тесные корреляционные зависимости между температурой почвы и воздуха в июне–сентябре и в ноябре–январе. Асинхронные связи характерны для периода с мая по август (сдвиг в один месяц) и с ноября по декабрь (температура почвы зависит от температуры воздуха предыдущего месяца). Температура воздуха в апреле, июле и августе определяет температуру почвы до ноября (сдвиг 4–7 месяцев). На глубине 80 см обнаружены тесные синхронные связи в течение всего года, а асинхронные – с марта по ноябрь (сдвиг 1 месяц). Температура воздуха в апреле–августе обуславливает температуру почвы до ноября (сдвиг 3–7 месяцев). На глубине 160 см синхронные связи характерны для апреля–октября, асинхронные – для марта–ноября (сдвиг 1 месяц). С марта по октябрь температура воздуха определяет температуру почвы до ноября–декабря. Температура воздуха с мая по август зависит от температуры почвы в предшествующие 4–7 месяцев.

Таким образом, на северо-востоке России температура почвы (до глубины 240 см) тесно связана с температурой воздуха (значение  $r$  между среднегодовой температурой почвы и воздуха находится в диапазоне от 0,50 до 0,64). Основной теплообмен между атмосферой и почвой на исследуемой территории приходится на весну и лето. В южном районе интересным фактом является наличие тесных корреляционных связей между температурой почвы на глубине 80 см и температурой воздуха в зимнее время. Скорее всего, это определяется особым типом почвы в данном районе (подзолистые почвы тайги).

В это же время выявлена зависимость температуры почвы от температуры воздуха со сдвигом в 1 месяц. Асинхронные связи с большим сдвигом характерны для всех глубин: температура воздуха весны и лета на всей территории обуславливает температуру почвы сентября–октября, а на юге и до декабря. Температура воздуха мая определяет среднегодовую температуру почвы почти по всей территории, лишь на глубине 20 и 160 см в центральном районе эта роль принадлежит июлю. В свою очередь, температура воздуха в октябре определяется теплом, накопленным почвой до глубины 120 см с мая по сентябрь.

### Выводы

Выявление закономерностей в изменении режима температуры воздуха и почвы на крайнем северо-востоке России в периоде 1966–2014 гг. показало следующее:

1. Повторяемость значительных по критерию  $K (\geq 2)$  полей аномальности температуры воздуха наиболее высока весной – 13 случаев (преимущественно в 80-е гг. прошлого столетия); для лета, осени и зимы определено по 4 случая таких полей.

2. Значительная аномальность летней и среднегодовой температуры воздуха приходится на текущее столетие и является положительной практически на всей территории; во время значительно холодных зим аномальность четко проявляется в центральной части, а во время теплых – в восточной части территории; значительная аномальность теплой осени проявляется в верхнем и среднем течении Колымы; осень, в отличие от других календарных сезонов, может быть аномально теплой в одной части территории и аномально холодной – в другой.

3. На исследуемой территории наблюдается устойчивое потепление, наиболее выраженное в переходные сезоны года, распределено оно крайне неравномерно, увеличиваясь с юга на север.

4. Летом повышение температуры воздуха не столь значительно по сравнению с переходными сезонами, его распределение по территории более равномерное и наблюдается на фоне увеличения площадной аномальности температуры воздуха.

5. Для зимнего сезона характерно похолодание, которое значительно выражено в январе почти на всей территории региона, а в декабре и феврале – лишь в виде отдельных очагов; одновременно в январе происходит уменьшение площадной аномальности температуры воздуха.

6. Осредненная по территории температура воздуха устойчиво повышается во все месяцы, за исключением января (в январе отмечена отрицательная тенденция), наибольшая скорость повышения температуры наблюдается в марте–апреле и в октябре–декабре.

7. Наблюдается устойчивое повышение температуры почвы, которое проявляется во все сезоны года, лишь на юге отмечается преимущественно зимнее повышение температуры почвы.

8. Взаимосвязь среднегодовой температуры воздуха и почвы до глубины 240 см статистически значима, однако основной теплообмен между атмосферой и почвой приходится на весну и лето. В южном районе в зимний сезон выявлено наличие тесных корреляционных связей между температурой почвы на глубине 80 см и температурой воздуха.

### Библиографический список

1. Багров Н.А., Мякишева Н.И. Некоторые характеристики аномалий средних месячных температур воздуха // Труды ММЦ. 1966. Вып. 9. С. 3–17.
2. Василевская Л.Н., Стоцкунте Ю.В., Федорова А.Г. Изменение сезонных температур почвы на северо-востоке России // Климатология и гляциология Сибири / под общ. ред. В.П. Горбатенко, В.В. Севастьянова. Томск, 2015. С. 220–223.
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2014. С. 413–423.
4. Зимов С.А. Мамонтовские степи и будущий климат // Наука в России. 2007. №5. С. 105–112.
5. Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А., Мяс Л.Т., Шерстюков Б.Г. Статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2006. №5. С. 27–38.
6. Информационный бюллетень «Изменение климата». 2015. №55. С. 9–10. URL: [http://www.meteorf.ru/upload/iblock/304/Izmenenie\\_klimata\\_N55\\_June-July](http://www.meteorf.ru/upload/iblock/304/Izmenenie_klimata_N55_June-July) (дата обращения: 04.02.2016).
7. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 248 с.
8. Никитин А.Я., Сосунова И.А. Анализ и прогноз временных рядов в экологических наблюдениях и экспериментах. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. пед. ун-та, 2003. 81 с.

9. Павлов А.В. Тренды современных изменений температуры на севере России // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 3. С. 22–27.

10. Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров // Справочник по климату СССР. Ч. 4. Л.: Гидрометеониздат, 1968. Вып. 34. 258 с.

11. Сточките Ю.В., Василевская Л.Н., Шлык Н.В. Районирование северо-востока России по сходству динамики температуры воздуха // Климатология и гляциология Сибири / под общ. ред. В.П. Горбатенко, В.В. Севастьянова. Томск, 2015. С. 132–135.

12. Татарченков М.И., Подковыркин В.В. Основные формы техногенных ландшафтов северо-востока СССР и направления их рекультивации (включая отработанные дряжные полигоны) // Биологические проблемы Севера : тез. докл. 9-го симп. «Экология животных, физиология и биохимия человека и животных, адаптация человека к Северу, охрана природы». Сыктывкар, 1981. Ч. 2. С. 212–213.

13. Федоров-Давыдов Д.Г., Давыдов С.П., Давыдова А.И., Зимов С.А., Мергелов Н.С., Остроумов В.Е., Сорокичиков В.А., Холодов А.Л., Митрошин И.А. Пространственно-временные закономерности сезонного протаивания почв на севере Колымской низменности // Криосфера Земли. 2004. Т. 8. №4. С. 15–26.

14. Шкаберда О.А., Василевская Л.Н. Многолетняя изменчивость температурно-влажностного режима на полуострове Камчатка // Известия ТИНРО. 2014. Т. 178. С. 217–233.

15. Semiletov I.P., Pipko I.I., Pivovarov N.Ya., Popov V.V., Zimov S.A., Voropaev Yu.V., and S.P.Davidov (1996) Atmospheric carbon emission from North Asian Lakes: a factor of global significance. *Atmospheric Environment* 30: 10/11, p.1657–1671.

16. Semiletov I.P., Zimov S.A., Voropaev Yu.V., Davidov S.P., Barkov N.I., Gusev A.M., Lipenkov V.Ya. (1994) Atmospheric Methane in past and present. *Trans. (Doklady) Russ. Acad. Sci.* v. 339, n 2, p.253–256.

17. Stochkute Yulija, Vasilevskaya Lubov N. «Changes of seasonal air temperatures and precipitation in the Far North-east of Russia» // PICES-2014, Book of abstracts October 16-26, 2014 Yeosu, Korea, 2015. P. 194.

18. Zimov, S.A., Davidov S.P., Voropaev Y.V., Prosiannikov S.F., Semiletov I.P., Chapin M.C., and F.S. Chapin, III. 1996. Siberian CO<sub>2</sub> efflux in winter as a CO<sub>2</sub> source and cause of seasonality in atmospheric CO<sub>2</sub>. *Climatic Change* 33:111–120.

19. Zimov S.A., Zimova G.M., Davidov S.P., Davidova A.I., Voropaev Y.V., Voropaeva Z.V., Prosiannikov S.F., Prosiannikova O.V., Semiletova I.V., Semiletov I.P.. Winter biotic activity and production of CO<sub>2</sub> in Siberian soils: a factor in the greenhouse effect. *Jour. Geophys. Res.*, 1993, 98, 5017 – 5023.

#### References

1. Bagrov, N.A. and Myakisheva, N.I. (1966), “Some characteristics of the anomalies of the average monthly air temperatures”, *Proceedings of the MMC*, vol. 9, pp. 3–17.

2. Vasilevskaya, L.N., Stochkute, Y.V., and Fedorova, A.G. (2015), “Changing of the seasonal soil temperature in the Far northeast of Russia”, *Klimatology and glaciology of Siberia*, Tomsk, Russia, 20-23 October 2015, pp. 220–223.

3. The second assessment report about climate change and their impact on the territory of the Russian Federation, (2014), available at: [http://downloads.igce.ru/publications/OD\\_2\\_2014/v2014/v1/Razdel\\_4](http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/v1/Razdel_4). pp. 413-423, (Accessed 7 January 2015).

4. Zimov, S.A. (2007), “Mammoth steppes and future climate”, *Science in Russia*, no.5, pp. 105–112.

5. Israel, Y.A., Pavlov, A.V., Anokhin, Y. A., Myach, L. T., and Sherstyukov, B.G. (2006), “Statistical evaluation of climate change elements in the permafrost of Russia”, *Meteorology and Hydrology*, no.5, pp. 27–38.

6. Newsletter (2015), “Climate Change”, no. 55, available at: [http://www.meteor.ru/upload/iblock/304/Izmenenie\\_klimata](http://www.meteor.ru/upload/iblock/304/Izmenenie_klimata) (Accessed 4 Feb. 2016).

7. Isaev, A.A. (1988), *Statistika v meteorologii i klimatologii* [Statistics in meteorology and climatology], Moscow State University, Moscow, Russia

8. Nikitin, A.J., and Sosunova, I.A. (2003), *Analiz i prognoz vremennyh ryadov v ekologicheskikh nabludeniyah i eksperimentah* [Analysis and forecast of the time series for environmental observations and experiments], Publishing House of Irkutsk state Pedagogical University, Irkutsk, Russia.

9. Pavlov, A.V. (2008) “Trends of contemporary changes in temperature in the north of Russia”, *Kriosfera zemli*, vol. 12, no. 3, pp. 22–27.

10. *Handbook of Climate of the USSR* (1968), vol.34, no.4, Gidrometeoizdat, Moscow, Russia.

11. Stochkute, Y.V., Vasilevskaya, L.N., and Shlyk, N.V. (2015), "Zoning of the Far northeast of Russia according to the similarity of the air temperature dynamics", *Klimatology and glaciology of Siberia*, Tomsk, Russia, 20-23 October 2015, pp.132–135.

12. Tatarchenkov, M.I. (1981), "The main forms of man-made landscape of the north-east of the USSR and direction of their recultivation [including dredging of waste landfills]", Tatarchenkov, M.I., and Podkovyrkin, V.V., *Biologicheskije problemy severa* [Biological problems of the North], *Proc. 9th Symp. Ekologija zhyvotnyh, fiziologija i biohimija cheloveka i zhyvotnyh, adaptacija cheloveka k severu, ohrana prirody* [Animal Ecology, physiology and biochemistry of humans and animals, human adaptation to the North, protection of nature], Syktyvkar, Russia, 1981, Part 2, p.212–213.

13. Fedorov-Davydov, D.G., Davydov, S.P., Davydov, A.I., Zimov, S.A., Mergelov, N.S., Ostroumov, V.E., Sorokovikov, V.A., Kholodov, A.L., and Mitroshin, I.A. (2004), "Spatial and temporal patterns of seasonal thawing of soil in the north of the Kolyma lowland", *Kriosfera zemli*, vol.8, no. 4, pp. 15–26.

14. Shkaberda, O.A., Vasilevskaya, L.N. (2014), "Long-term variability of temperature and humidity on the Kamchatka Peninsula", *TINRO News*, vol. 178, pp. 217–233.

15. Semiletov, I.P., Pipko, I.I., Pivovarov, N.Ya., Popov V.V., Zimov, S.A., Voropaev, Y.V., and Daviodov, S.P. (1996), "Atmospheric carbon emission from North Asian Lakes: a factor of global significance", *Atmospheric Environment*, vol. 30, no. 10/11, pp.1657–1671.

16. Semiletov, I.P., Zimov, S.A., Voropaev, Y.V., Daviodov, S.P., Barkov, N.I., Gusev, A.M., and Lipenkov, V.Y. (1994), "Atmospheric methane in past and present", *Russian Academy of Science*, vol. 339, no. 2, pp.253–256.

17. Stochkute, Y. V., and Vasilevskaya, L. N. (2014), "Changes of seasonal air temperatures and precipitation in the Far North-east of Russia", *PICES-2014*, Book of abstracts, October 16-26, Yeosu, Korea, 2015, p. 194.

18. Zimov, S.A., Davidov, S.P., Voropaev, Y.V., Prosiannikov, S.F., Semiletov, I.P., Chapin, M.C., and Chapin, F.S. (1996), "Siberian CO<sub>2</sub> efflux in winter as a CO<sub>2</sub> source and cause of seasonality in atmospheric CO<sub>2</sub>", *Climatic Change*, vol.33, pp. 111–120.

19. Zimov, S.A., Zimova, G.M., Daviodov, S.P., Daviodova, A.I., Voropaev, Y.V., Voropaeva, Z.V., Prosiannikov, S.F., Prosiannikova, O.V., Semiletova, I.V., and Semiletov, I.P. (1993), "Winter biotic activity and production of CO<sub>2</sub> in Siberian soils: a factor in the greenhouse effect", *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, pp. 5017 – 5023.

Поступила в редакцию: 05.02.2016

#### Сведения об авторах

#### About the authors

##### СточкUTE Юлия Витауго

аспирантка кафедры океанологии и гидрометеорологии Дальневосточного федерального университета;  
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8;  
e-mail: julias76@mail.ru

##### Yulija V. Stochkute

graduate student, Department of Oceanology and hydrometeorology, Far Eastern Federal University;  
8, Sukhanova st., Vladivostok, 690950, Russia;  
e-mail: julias76@mail.ru

##### Василевская Любовь Николаевна

кандидат географических наук, доцент кафедры океанологии и гидрометеорологии Дальневосточного федерального университета;  
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8;  
e-mail: lubavass@mail.ru

##### Lubov N. Vasilevskaya

Ph.D., Associate Professor, Department of Oceanology and hydrometeorology, Far Eastern Federal University;  
8, Sukhanova st., Vladivostok, 690950, Russia;  
e-mail: lubavass@mail.ru

#### Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

СточкUTE Ю.В., Василевская Л.Н. Многолетние изменения температуры воздуха и почвы на крайнем северо-востоке России // Географический вестник. 2016. № 2(37). С. 84–96. doi 10.17072/2079-7877-2016-2-84-96

#### Please cite this article in English as:

Stochkute Y.V., Vasilevskaya L.N. Evaluation of long-term air and soil temperature changes on the far north-east of Russia // *Geographicheskij Vestnik*. 2016. № 2(37). P. 84–96. doi 10.17072/2079-7877-2016-2-84-96