

*Геологический институт КНЦ РАН
Российское минералогическое общество
Кольское отделение*

*Труды XVI Всероссийской научной школы
“Математические исследования
в естественных науках”*



Апатиты, 22 октября 2019 г.

УДК 548.1+548.3+549.621.9+550.8+552.323.6+551.50+58.051+51-76
ISSN 2074-2487

Математические исследования в естественных науках. Труды XVI Всероссийской научной школы. Апатиты, Геологический институт КНЦ РАН, Кольское отделение РМО, 22 октября 2019 г. / Научн. ред. Ю.Л. Войтеховский. – Апатиты, 2019. - 180 с.

В сборнике представлены материалы XVI Всероссийской научной школы «Математические исследования в естественных науках», прошедшей в Геологическом институте КНЦ РАН, г. Апатиты, 22 октября 2019 г. при информационной поддержке Кольского отделения и Российского минералогического общества. В секциях «Кристаллография и кристаллохимия», «Геология, геофизика и геохимия» и «Биология и экология» были представлены порядка 20 докладов, которые вошли в этот сборник. Издание представляет интерес для геологов широкого профиля и студентов геологических специальностей.

Научное издание рекомендовано к печати Учёным советом Геологического института КНЦ РАН и Советом Кольского отделения РМО.

Электронная версия: <http://geoksc.apatity.ru>

Научный редактор: проф., д.г.-м.н. Ю.Л. Войтеховский

Компьютерный дизайн: Л.Д. Чистякова

Фоторепортаж: Н.А. Мансурова, А.В. Чернявский

Фото на обложке: Yandex. Фото Хибин.

© Коллектив авторов, 2019

© Российское минералогическое общество и Кольское отделение, 2019

© Геологический институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки ФИЦ КНЦ РАН, 2019

ПРОВЕРКА КЛИМАТИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ РЯДОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В БАРЕНЦБУРГЕ (ШПИЦБЕРГЕН)

Демин В.И.¹, Иванов Б.В.²

¹ Полярный геофизический институт, Апатиты, demin@pgia.ru

² Арктический и антарктический НИИ, Санкт-Петербург, b_ivanov@aari.ru

Аннотация. Проведена проверка рядов температуры воздуха на гидрометеорологической обсерватории «Баренцбург» (Шпицберген). Измерения начались в 1932 г., но метеорологическая площадка переносилась в 1978 и 1984 гг. Несмотря на переносы, статистические тесты не показали нарушений методической однородности. Ряды температуры воздуха в Баренцбурге можно использовать для оценок изменений климата в регионе за весь период наблюдений с 1932 г.

Summary. Time series of the air temperature in the Barentsburg hydrometeorological observatory (Svalbard) were checked. The measurements started in 1932. The meteorological station was moved in 1978 and 1984. Homogeneity testing by the Standard Normal Homogeneity test, the Buishand test, the Pettitt test and the Von Neumann ratio test did not detect any inhomogeneities in the series. The whole series of the Barentsburg air temperature can be used to estimation of the regional climate changes.

Введение

Метеорологические наблюдения в Баренцбурге начались в 1932 г. и продолжаются по настоящее время (гидрометеорологическая обсерватория (ГМО) Мурманского УГМС). Это наиболее длительный ряд наблюдений среди всех метеорологических станций (МС), когда-либо работавших на архипелаге Шпицберген, в т.ч. числе по непрерывности измерительной серии. В состав глобальной сети станций наблюдений за климатом от Шпицбергена включена МС «Svalbard Airport» (аэропорт в г. Лонгйир). МС «Svalbard Airport» работает только с 1975 г. Существуют методики, позволяющие рассчитать температуру на станции в периоды отсутствия наблюдений по её значениям на ближайших МС (см., например, [5, 13, 14]). Благодаря таким процедурам, температурные ряды для МС «Svalbard Airport» были продлены до 1898 г. [14]. Однако использование оригинальных данных вместо восстановленных каким-либо путём, безусловно, представляет больший научный интерес.

Одним из главных требований, предъявляемых в климатологии к рядам наблюдений, является однородность: характеристики рядов должны меняться только в соответствии с естественной изменчивостью макропроцессов и не содержать эффектов, вызванных сменой методики производства измерения, типов измерительных приборов, переносом измерительной площадки или искусственным изменением окружающей местности. Известно, что метеорологическая площадка в Баренцбурге неоднократно переносилась, а

своё современное положение она занимает только с 1984 г. Целью данной работы является проверка климатической однородности рядов температуры воздуха на ГМО «Баренцбург» и возможности их использования для оценок долговременных изменений климата.

Использованные данные

В работе использованы данные ВНИИ Гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) и Норвежского метеорологического института (Осло).

История метеорологических наблюдений в Баренцбурге

Первая советская МС на архипелаге Шпицберген была открыта в конце 1931 г. на руднике Грумант-Сити (южное побережье залива Ис-фьорд). Но уже в 1932 г. её перенесли к руднику Баренцбург в заливе Грен-фьорд. Метеорологическая площадка располагалась на северо-восточной окраине посёлка у подножья горы на высоте около 70 м в 400-450 м от восточного берега залива Грен-фьорд и примерно в 100 м от жилых зданий. С 1 июня 1978 г., в связи с расширением посёлка (строительство новых жилых и административных зданий), метеонаблюдения перенесли на узкую прибрежную террасу с отметкой 22 м н. у. м. в 70-80 м от залива. Последний перенос произошёл в феврале 1984 г.: с этого момента и по настоящее время метеорологические наблюдения проводятся на южной окраине посёлка на расстоянии ~330 м от залива и на высоте 74 м н. у. м. Положение метеорологических площадок в разные годы показано на рисунках 1 и 2.

Исходя из истории наблюдений, можно предположить в рядах температуры воздуха на ГМО «Баренцбург» два потенциально возможных наруше-



Рис. 1. Посёлок Баренцбург (фото Дмитрия Дексгеймера); отмечены положения метеорологической площадки ГМО: 1 – 1932-1978 гг., 2 – 1978-1984 гг., 3 – с 1984 г.

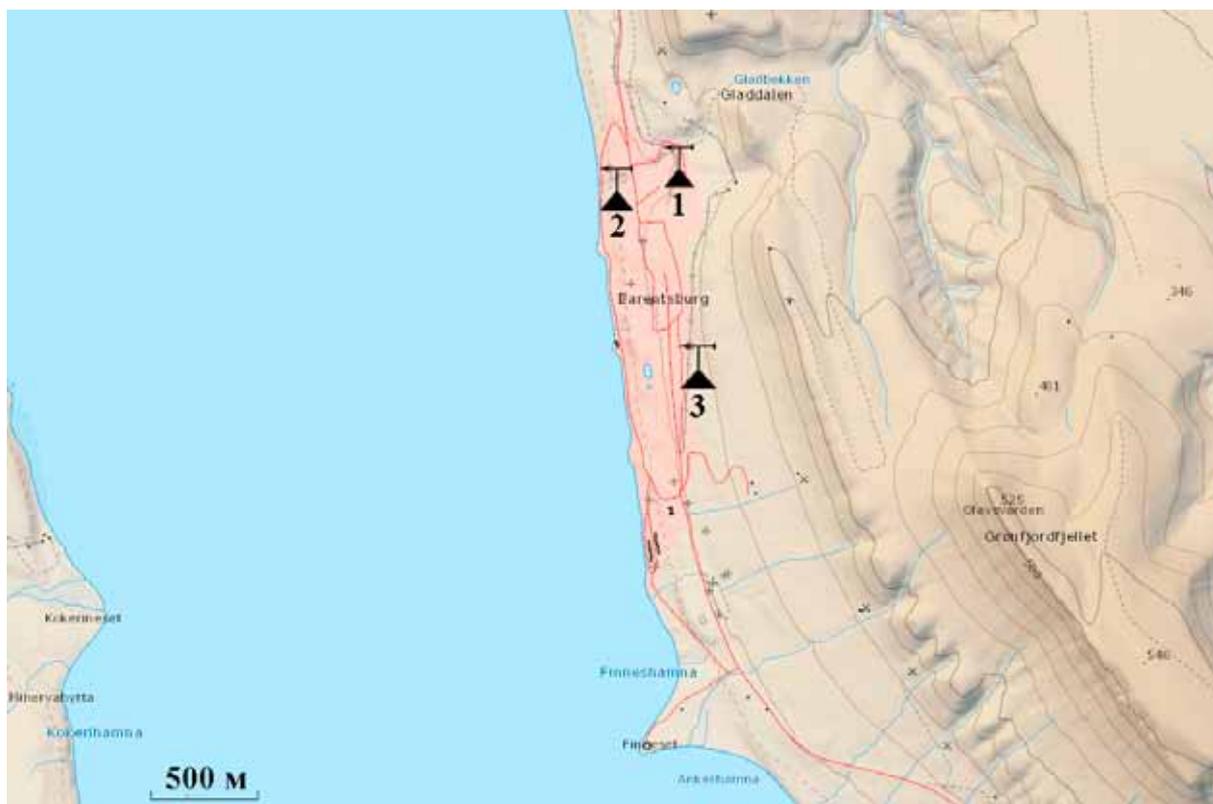


Рис. 2. Топографическая карта Баренцбурга и его окрестностей; отмечены положения метеорологической площадки в разные годы (номера соответствуют подписям к рис. 1).

ния однородности, вызванные переносами метеорологической площадки: в 1978 и 1984 г.

Первый фактор, который мог привести к нарушению однородности, – изменение расстояния от метеорологической площадки до берега залива Грен-фьорд (400-450 м, 70-80 м, 330 м соответственно для участков 1, 2, 3 на рис. 1 и 2). Зимой вода теплее воздуха, и даже подо льдом арктические моря «работают» как огромные резервуары тепла. В этот период года воздух над заливом должен быть теплее по сравнению с участками, удаленным от берега. Летом температура воды ниже температуры воздуха, и тепловой эффект залива имеет обратный знак.

Существует также предположение, что в период нахождения приборов на площадке 2, значения температуры воздуха могли искажаться (завышаться) вследствие протекания по оврагу в 10 м от метеорологических будок с термометрами тёплых сточных вод столовой рудника и подсобного хозяйства [4, 13]. Однако тепловая мощность этого источника, очевидно, невелика. В любом случае, ручей только усиливал обогревающий эффект залива зимой, обостряя контраст участка 2 по отношению к участкам 1 и 3.

Другой фактор, который мог привести к появлению неоднородности – изменение высоты размещения метеорологической площадки: 70, 22 и 74 м н. у. м. соответственно для участков 1, 2, 3. Зимой из-за преимущественно инверсионного распределения температуры воздуха в приземном слое перенос наблюдений на нижерасположенный участок должен привести к пони-

жению температуры, а летом – к её повышению. Согласно измерениям, проведённым на склоне вблизи Retuniabukta (~90 км на СВ от Баренцбурга), вертикальный градиент температуры в слое 23-136 м зимой равен $-0.53\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, а летом $0.53\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ [8].

Более критичным, чем различие высот, могло бы стать изменение формы окружающего рельефа. Известно, что даже слабовыраженные изменения рельефа сильно влияют на термический режим местности из-за неодинаковых условий для стока и накопления холодного воздуха. Например, по измерениям на Кольском п-ове, разность температур между верхней частью небольшого холма и его подножием на расстояние 2 км и разности высот между ними около 20 м достигает зимой $10-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]. На Шпицбергене при установлении тихой и ясной погоды за счёт длительного радиационного выхолаживания (полярная ночь) должны существовать не меньшие по величине пространственные неоднородности.

Однако вся территория Баренцбурга располагается у подножия гор на довольно крутом склоне (рис. 1-3). Условия для накопления и застоя холодного воздуха отсутствуют во всех трёх местоположениях, где находилась ГМО.

Искажающее влияние посёлка, на окраине которого находится метеорологическая площадка, ожидается малым по величине. Например, даже в таком крупном городе как Мурманск, несмотря на 300-тыс. население и активную промышленную и хозяйственную деятельность, показания городской МС не искажены городским островом тепла [2].



Рис. 3. Баренцбург на склоне горы (фото с сайта: https://knowhow.pp.ua/northern-most_towns_svalbard).

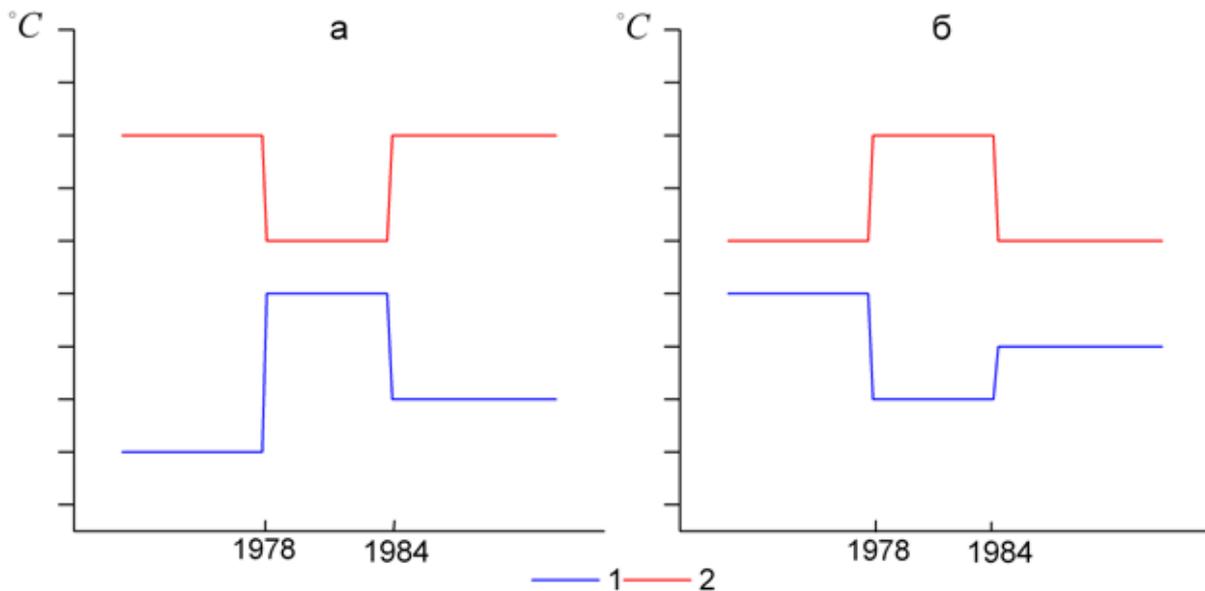


Рис. 4. Схематичные изменения температуры воздуха при переносе ГМО «Баренцбург»: 1 – за счёт изменения высоты, 2 – за счёт изменения расстояния до залива; а – зима, б – лето.

С учётом отмеченных особенностей участков 1, 2, 3, возможные изменения температуры воздуха на ГМО «Баренцбург» при переносе в 1978 г. (с участка 1 на участок 2) можно представить следующим образом: зимой температура воздуха должна была повыситься из-за тепляющего влияния залива, и уменьшиться за счёт понижения высоты; летом температура должна была понизиться из-за близости холодной воды и повыситься за счёт понижения участка. При переносе в 1984 г. (с участка 2 на участок 3) изменения должны были произойти с обратным знаком. Качественная картина ожидаемых сдвигов в рядах температуры воздуха при переносах метеорологической площадки в Баренцбурге показана на рисунке 4.

Методы обнаружения неоднородностей в метеорологических рядах

Традиционный в климатологии метод установления однородности – анализ разности или отношения синхронных значений метеорологических величин на соседних станциях. Долгое время считалось, что ряды разностей (отношений) остаются приблизительно постоянными от года к году, так как атмосферные процессы охватывают одновременно большие пространства и сказываются на данных близкорасположенных МС примерно одинаково. Появившийся в ряду разностей сдвиг рассматривали как признак нарушения методической однородности.

Ближайшая МС, которая не меняла своего положение в периоды переносов ГМО «Баренцбург», – МС «Svalbard Airport» (~37.5 км на СВ от Баренцбурга). На рис. 5 показаны разности сезонных температур между ГМО «Баренцбург» и «Svalbard Airport». Разности температур не остаются постоянными на всём интервале параллельной работы данных МС. Однако важно, что:

1) нет «скачка» в разностях сразу после переносов ГМО «Баренцбург» в 1978 и 1984 гг.;

2) основные изменения пришлись не на годы переносов ГМО в «Баренцбурге», а в более поздний период;

3) изменения разностей происходят по-разному в разные сезоны.

Оснований для заключения о нарушении однородности на ГМО «Баренцбург» нет.

Современными исследованиями показано, что утверждение об относительном постоянстве разностей (или отношений) метеоэлементов, строго говоря, не является правильным. В зависимости от характера макроциркуляционных процессов в конкретном месяце или сезоне создаются температурные аномалии различной географической локализации. Положение сравниваемых станций относительно зон аномалий оказывает влияние на временной ход разности температур между ними. Кроме того, повторяемость метеорологических условий, благоприятных для проявления микроклиматических особенностей местности в разные циркуляционные эпохи неодинаковая. Это также приводит к изменению разностей температуры на МС, расположенных на участках с разным микроклиматом.

В соответствии с принятой в настоящее время международной практикой при проверке однородности метеорологических рядов используется комбинированный статистический подход [6, 9]. При этом последовательно используются четыре статистических теста.

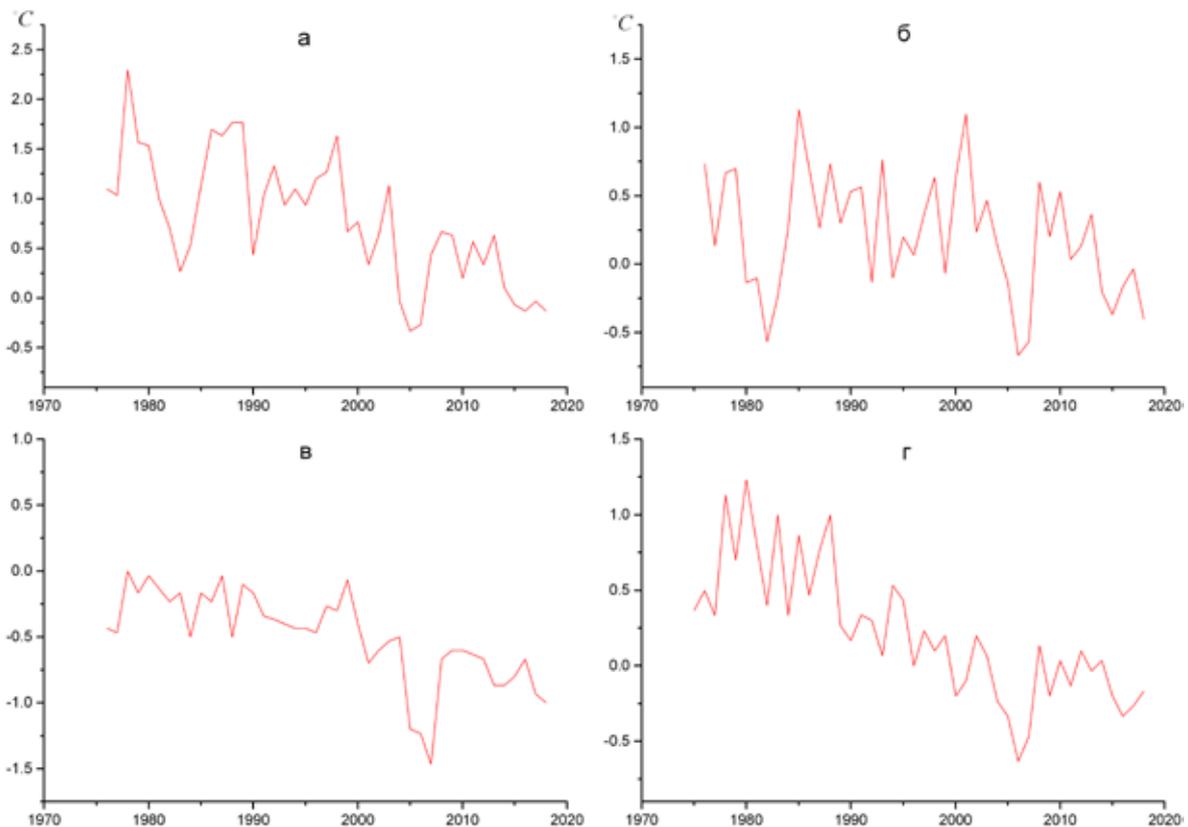


Рис. 5. Разности средних сезонных температур между ГМО «Баренцбург» и МС «Svalbard Airport»: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень.

1. Стандартный нормальный тест для проверки однородности (SNHT) [7]

Имеется ряд метеорологической величины Y_1, \dots, Y_n . Ряд длиной n разбивается на 2 части, содержащий k и $n-k$ членов.

$$T_k = k(\bar{z}_1)^2 + (n-k)(\bar{z}_2)^2,$$

где $\bar{z}_1 = \frac{1}{k} \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y})}{s}$ и $\bar{z}_2 = \frac{1}{n-k} \frac{\sum_{i=k+1}^n (Y_i - \bar{Y})}{s}$, $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$, $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$.

Если в момент K имеет место сдвиг, функция $T(k)$ достигает максимального значения вблизи $k=K$. Нулевая гипотеза (ряд однороден) отвергается, если T_{max} выше некоторого критического значения, определяемого по длине выборки.

Пример работы SNHT показан на рисунке 6.

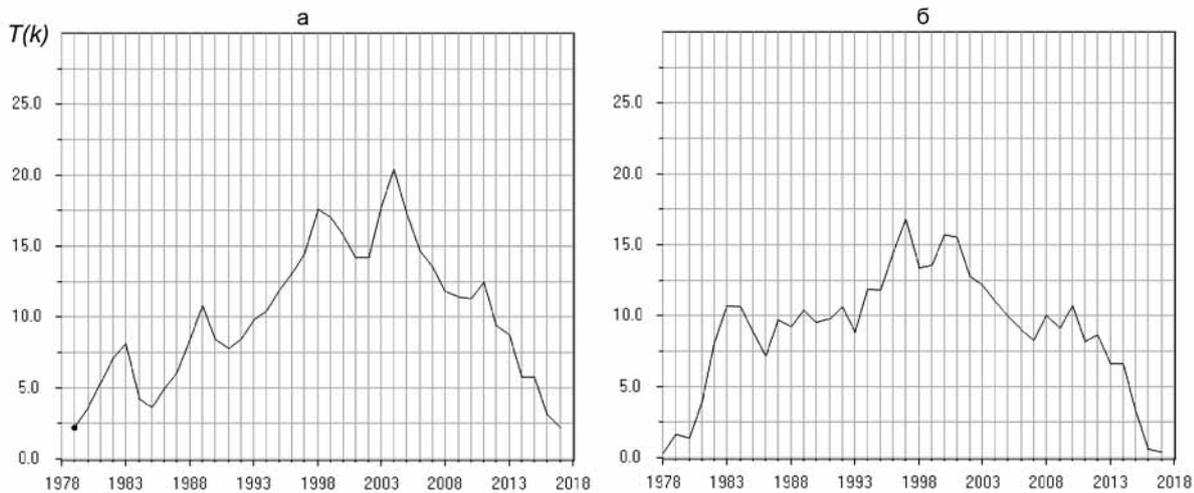


Рис. 6. Вариации функции $T(k)$ в тесте SNHT (описание в тексте) для средних зимних (а) и летних (б) температур в Баренцбурге.

2. Тест Буишанда [11]

Находятся суммы

$$S_k^* = \sum_{i=1}^k (y - y_i), \quad k=1, \dots, n$$

Если ряд однороден, то ряд, составленный из разностей значений $y - y_i$ – случайный, а сумма близка к нулю ($S_n^* = 0$).

Если в k -ый год произошло нарушение однородности, то сумма, составленная из разностей значений, симметричных относительно момента нарушения однородности, достигает экстремума (максимума или минимума). Статистическая значимость сдвига оценивается по параметру $R = \frac{S_{max} - S_{min}}{s}$.

3. Непараметрический тест Петита [15]

Ряд метеорологической величины Y_1, \dots, Y_n ранжируется, а полученные r_1, \dots, r_n ранги используются для расчёта статистики

$$X_k = 2 \sum_{i=1}^k r_i - k(n+1)$$

Если сдвиг имеет место в момент E , статистика достигает максимального или минимального значения

$$X_E = \max_{1 \leq k \leq n} |X_k|$$

4. Отношение Фон-Ноймана [17]

$$N = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Y_i - Y_{i+1})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Ряд считается однородным, если значение N близко к 2. Если ряд содержит сдвиг, значение N меньше 2. Если в ряду происходят быстрые изменения (имеется тренд), значения N могут превышать 2 [10]. Тест Фон-Ноймана указывает только на факт сдвига без указания года.

Следует заметить, что в случае быстрых климатических изменений статистические тесты могут показать нарушение однородности, даже если его на самом деле не было. Например, быстрое потепление последних десятилетий многие тесты часто «принимают» за перенос МС в более тёплое местоположение. По этой причине утверждение о нарушении однородности принимается только с учётом истории МС: статистическое нарушение должно обнаруживаться не в одном из месяцев, а в нескольких (а лучше и не в одном сезоне) и быть близким по времени к моменту переноса МС.

Результаты применения тестов

Значения температуры воздуха с ГМО «Баренцбург» доступны с 1932 г. Однако с началом войны в июле 1941 г. метеорологические наблюдения в Баренцбурге прекратились и возобновились только в 1947 г. Учитывая большой временной разрыв, данные за 1932-1941 гг. в анализе не использовались. Последующая непрерывная серия наблюдений 1947-2018 гг. была разбита на 2 периода: с декабря 1947 г. по май 1984 г. (включает перенос ГМО в 1978 г. и потенциальный сдвиг в рядах, показанный на рис. 4), и с июня 1978 г. по декабрь 2018 г. (содержит перенос 1984 г. и обратный сдвиг (рис. 4).

К рядам среднемесячной температуры воздуха в данных периодах были применены тесты SNHT, Буишанда, Петита и Фон-Ноймана. В соответствии с установленными правилами [6] ряд считается однородным, если не выполняется только один из тестов. В случае, когда два теста отрицают однород-

ность на 1 % уровне вероятности, ряд считается сомнительным. Если наличие неоднородности ряда подтверждается третьим или четвёртым тестами, ряд считается неоднородным.

Так как средние температуры относительно малочувствительны к изменениям микроклимата, тестированию были подвергнуты также ряды среднемесячных минимальных и максимальных температур (получены по суточным данным с сайта ВНИИГМИ-МЦД (содержат много пропусков). Результаты проверки представлены в таблицах 1-6, где указаны годы нарушения однородности по тому или иному тесту.

В период декабрь 1947 – январь 1984 гг. тесты SNHT, Буишанда, Петтита, Фон-Ноймана не показывают нарушений однородности в рядах температуры (средней, средней минимальной и максимальной), причём как в комплексе, так и каждый в отдельности (табл. 1-3). Перенос метеорологической площадки ближе к заливу и понижение её высоты никак не проявилось в рядах температуры воздуха, точнее, обусловленные переносом изменения температуры оказались очень малы по сравнению с их естественными вариациями и ими можно пренебречь. Ряды в период 1947-1984 гг. следует считать однородными.

Таблица 1. Результаты тестирования рядов среднемесячной температуры на ГМО «Баренцбург», 1947-1984 гг.

Месяц	Тест			
	SNHT	Тест Буишанда	Тест Петтита	Фон-Ноймана
Январь	–	–	–	–
Февраль	–	–	–	–
Март	–	–	–	–
Апрель	–	–	–	–
Май	–	–	–	–
Июнь	–	–	–	–
Июль	–	–	–	–
Август	–	–	–	–
Сентябрь	–	–	–	–
Октябрь	–	–	–	–
Ноябрь	–	–	–	–
Декабрь	–	–	–	–

Во время переноса в 1984 г. изменения должны были носить противоположный характер, чем в 1978 г.: ГМО отнесли дальше от берега и практически возвратили на тот же высотный уровень. Уже одно это обстоятельство не позволяет ожидать выраженного нарушения однородности. Статистические тесты показывают на присутствие сдвигов в рядах (табл. 3-6) в отдельные месяцы, однако все они происходят в годы, далёкие от 1984 г. Это реакция те-

стов на современное потепление климата. Ряды температуры воздуха на МС «Баренцбург» в период 1978-2018 гг. также следует считать однородными.

С учётом того, что измерения, выполненные в 1932-1941 гг., фактически являются дополнением ряда 1947-1978 гг., можно говорить об однородности рядов температуры за весь период наблюдений в Баренцбурге с 1932 г.

Таблица 2. Результаты тестирования рядов среднемесячной минимальной температуры на ГМО «Баренцбург», 1947-1984 гг.

Месяц	Тест			
	SNHT	Тест Буишанда	Тест Петтита	Фон-Ноймана
Январь	–	–	–	–
Февраль	–	–	–	–
Март	–	–	–	–
Апрель	–	–	–	–
Май	–	–	–	–
Июнь	–	–	–	–
Июль	–	–	–	–
Август	–	–	–	–
Сентябрь	–	–	–	–
Октябрь	–	–	–	–
Ноябрь	–	–	–	–
Декабрь	–	–	–	–

Таблица 3. Результаты тестирования рядов среднемесячной максимальной температуры на ГМО «Баренцбург», 1947-1984 гг.

Месяц	Тест			
	SNHT	Тест Буишанда	Тест Петтита	Фон-Ноймана
Январь	–	–	–	–
Февраль	–	–	–	–
Март	–	–	–	–
Апрель	–	–	–	–
Май	–	–	–	–
Июнь	–	–	–	–
Июль	–	–	–	–
Август	–	–	–	–
Сентябрь	–	–	–	–
Октябрь	–	–	–	–
Ноябрь	–	–	–	–
Декабрь	–	–	–	–

Обсуждение результатов

В климатологии известно, что не всякий перенос МС сопровождается нарушением однородности в рядах метеорологических параметров. Например, перенос в 1974 г. МС в Нью-Олесунне на 1.6 км от прежнего местопо-

жения с изменением высоты с 42 до 8 м н. у. м., согласно [12], не сказался на однородности температурных рядов. Тем не менее, отсутствие в статистической структуре рядов температуры воздуха на ГМО «Баренцбург» реакции на изменение положения требует некоторого объяснения.

Таблица 4. Результаты тестирования рядов среднемесячной температуры на ГМО «Баренцбург», 1978-2018 гг.

Месяц	Тест			
	SNHT	Тест Буишанда	Тест Петтита	Фон-Ноймана
Январь	2005	2005	2005	+
Февраль	2005	2005	2005	–
Март	–	–	–	–
Апрель	–	–	–	–
Май	2004	2004	2004	–
Июнь	2002	2002	2002	+
Июль	–	–	–	–
Август	1998	1998	1998	–
Сентябрь	–	–	–	–
Октябрь	–	2000	2000	+
Ноябрь	–	1996	1996	–
Декабрь	2004	2004	2004	+

Таблица 5. Результаты тестирования рядов среднемесячной минимальной температуры на ГМО «Баренцбург», 1978-2018 гг.

Месяц	Тест			
	SNHT	Тест Буишанда	Тест Петтита	Фон-Ноймана
Январь	2005	2005	2005	+
Февраль	2005	2001	2000	+
Март	–	–	–	–
Апрель	–	–	–	–
Май	2003	2004	2003	–
Июнь	2002	2002	2002	+
Июль	–	–	–	–
Август	2001	1998	–	–
Сентябрь	–	–	–	–
Октябрь	2014	2000	2009	–
Ноябрь	–	–	1996	–
Декабрь	2004	2004	2004	–

Тепловой эффект залива резко убывает с удалением от берега. Влияние крупных водоёмов (морей) зимой обычно прослеживается на расстояние до 2–3 км, но в случае холодных морей воздействие на средний минимум (не путать с абсолютным минимумом!) не обнаруживается даже в при

Таблица 6. Результаты тестирования рядов среднемесячной максимальной температуры на ГМО «Баренцбург», 1978-2018 гг.

Месяц	Тест			
	SNHT	Тест Буишанда	Тест Петтита	Фон-Ноймана
Январь	2005	2005	2005	+
Февраль	2005	2005	2005	–
Март	–	–	–	–
Апрель	–	–	–	–
Май	2003	2003	2003	+
Июнь	2002	2002	2002	–
Июль	–	–	–	–
Август	–	–	2001	–
Сентябрь	–	–	–	–
Октябрь	2014	2000	2007	–
Ноябрь	–	–	–	–
Декабрь	2004	2004	2004	–

брежной зоне. Например, влияние Балтийского моря проявляется только в западных районах (Калининградская область, Литва) [1]. В холодное время года не даёт увеличения среднего минимума и северная половина Азовского моря [1]. Очевидно, что влияние узких заливов еще слабее, чем обширных морских акваторий. Можно предположить, что влияние залива Грен-фьорд на термический режим прибрежных территорий ограничивается только первыми десятками метров от кромки воды. По этой причине переносы метеорологической площадки, когда расстояние до залива менялось с 400-450 до 70-80 м (1978 г.), а потом – до 330 м (1984 г.), в температуре воздуха практически не проявились. Летом, благодаря меньшей разности температур между воздухом и водной поверхностью, тепловое воздействие залива должно быть еще менее выраженным, чем зимой.

Нельзя также исключить, что зимой повышение температуры за счёт приближения к заливу (1978 г.) было скомпенсировано переносом измерений в более низкое местоположение, где в это время года холоднее из-за инверсионного распределения температуры. Летом, наоборот, – более низкая высота площадки могла «нейтрализовать» охлаждающее влияние залива. В 1984 г. суммарный эффект от переноса метеоплощадки мог также оказаться нулевым из-за одновременного удаления от залива и повышения высоты.

Немаловажен и ещё один фактор: микроклиматические неоднородности между отдельными местоположениями в наибольшей степени проявляются только в тихую и ясную погоду. Облачность ослабляет радиационное выхолаживание, а при скоростях ветра более 2-3 м/с возникает интенсивное турбулентное перемешивание, которое выравнивает распределение температуры воздуха. Повторяемость ситуаций, когда в Баренцбурге ясно или малооб-

лачно и почти отсутствует ветер, небольшая (рис. 7). Вследствие этого вклад микроклимата в среднемесячные значения оказывается незначительным.

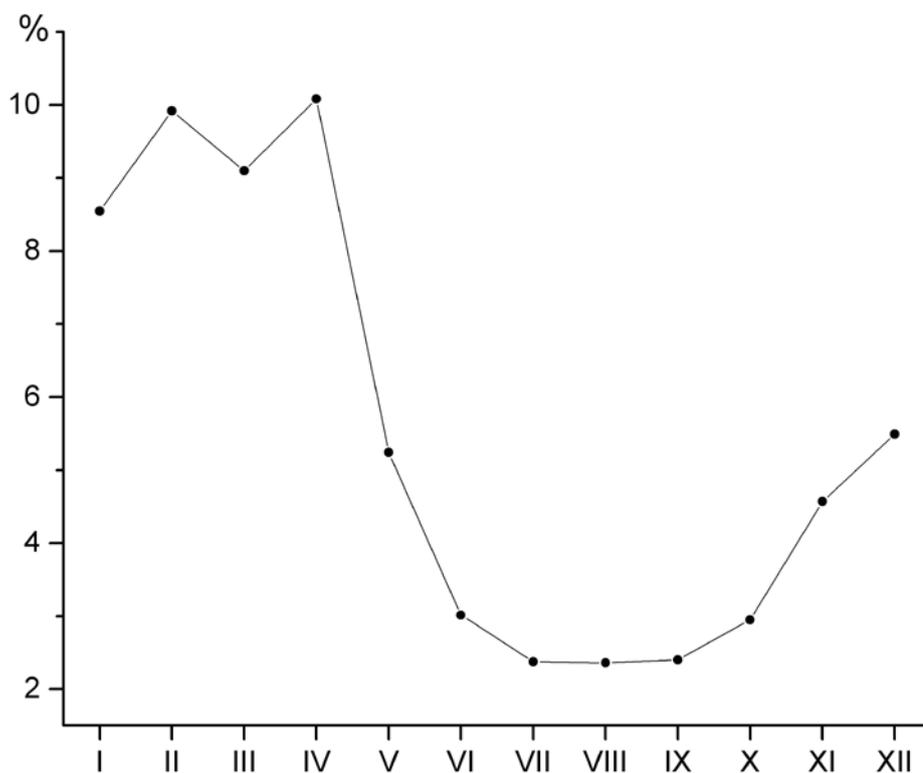


Рис. 7. Повторяемость малооблачной погоды (общая облачность ≤ 3 баллов) и скорости ветра ≤ 1 м/с (построен по данным массива срочных данных основных метеорологических параметров ВНИИГМИ-МЦД).

Влияние макроциркуляционных процессов и микроклимата на точность восстановления длинных температурных рядов

В настоящее время базовым температурным рядом для оценок климатических изменений на архипелаге Шпицберген является ряд МС «Svalbard Airport». Он содержит данные о температуре воздуха с 1898 г. Однако оригинальные (измеренные) значения на МС «Svalbard Airport» имеются только с августа 1975 г. Все значения в предыдущие годы были получены восстановлением с использованием данных других МС. Как правило, для такого восстановления находятся коэффициенты линейных регрессий (a , b), связывающие температуру воздуха на изучаемой МС (T) с температурой на МС-аналоге (T_a) в период их совместной (параллельной) работы по формуле $T = aT_a + b$. Далее по найденным выражениям выполняется расчёт отсутствующих значений T на искомой МС по известным значениям T_a на МС-аналоге.

Такой метод подразумевает, что численные значения коэффициентов a и b , установленные по какому-либо периоду, сохраняются и в прошлом. Это предположение, строго говоря, не является верным. Выше уже отмечалось, что разности температур даже между достаточно близкорасположенными МС не остаются постоянными из-за меняющихся макроциркуляционных процессов.

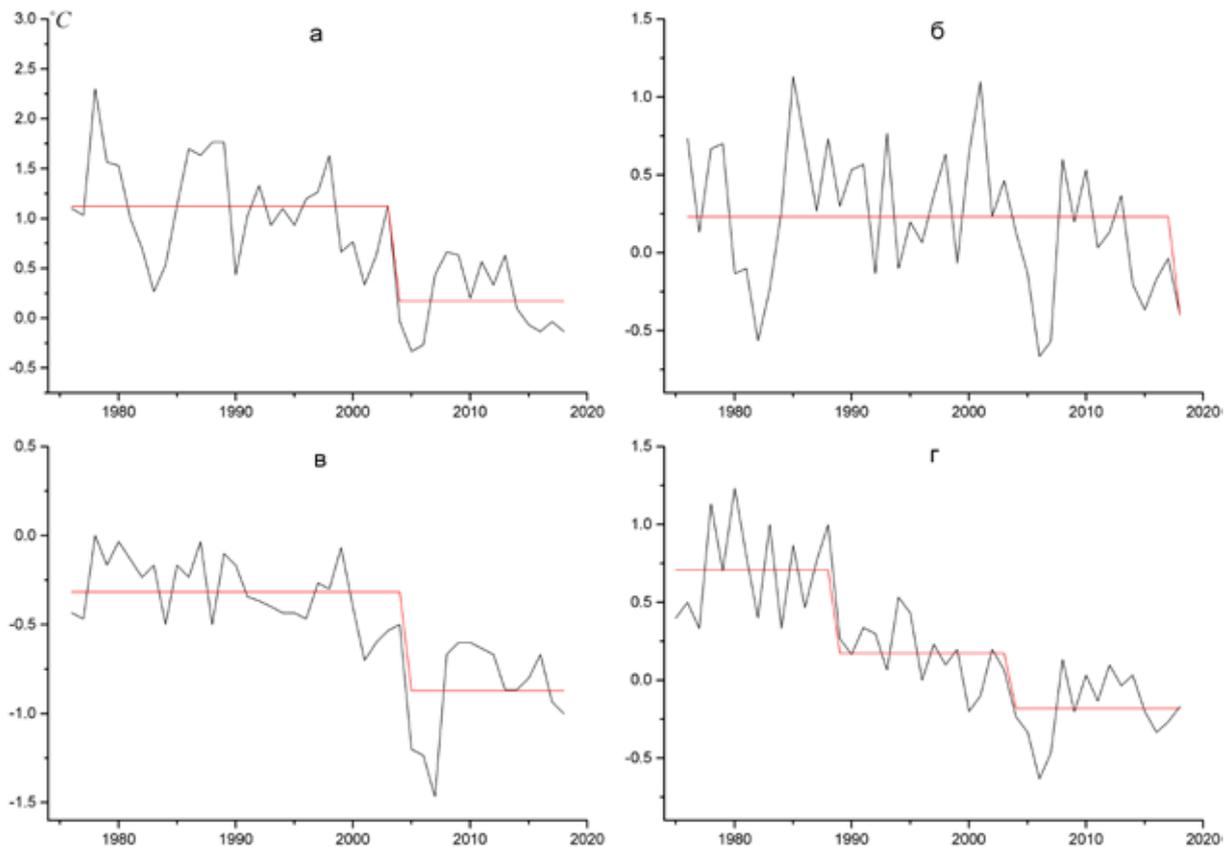


Рис. 8. Сдвиги в разностях средних сезонных температур на ГМО «Баренцбург» и МС «Svalbard Airport», выявленные тестом Родионова ($p=0.01$, длина временного лага – 10 лет).

Применим к разностям сезонных температур на ГМО «Баренцбург» и МС «Svalbard Airport» тест С. Родионова (Rodionov test) [16], позволяющий обнаруживать статистически значимое различие между средними значениями на отдельных участках ряда. Данный тест показывает, что ряд разностей во все сезоны разбивается на отдельные интервалы (рис. 8). Например, осенью (сентябрь-ноябрь) можно выделить 3 интервала: 1976-1988, 1989-2003, и 2004-2018 гг., на границах которых разность получает статистически значимый сдвиг. Соотношения между температурами на МС в эти периоды разные.

На рис. 9а показана связь средних осенних температур на МС «Svalbard Airport» и на ГМО «Баренцбург» в период их параллельной работы 1975-2018 гг. Хорошая корреляция (коэффициент корреляции равен 0.988) позволяет нам использовать полученное уравнение регрессии для расчёта средних осенних температур на МС «Svalbard Airport» в 1932-1974 гг., когда МС «Svalbard Airport» не существовало, по значениям температуры на ГМО «Баренцбург» – выполнить реконструкцию ряда на МС «Svalbard Airport».

На рисунке 9б показано, как все точки на рисунке 9а, по которым была удачно построена линейная регрессия, совсем неслучайно разбиваются на 3 группы (границы установлены тестом С. Родионова), в каждой из которых своя (и не менее хорошая) регрессия (коэффициенты корреляции 0.990, 0.997 и 0.993). Например, приняв значение температуры в Баренцбурге -10°C , по

уравнению, полученному по выборке 1976-2018 г., найдём расчётное значение температуры на МС «Svalbard Airport» равное -11.2°C . Если же период параллельной работы со МС-аналогом пришёлся бы на другие годы, уравнение связи оказалось бы с другими численными параметрами, и при температуре на МС-аналоге -10°C , расчётные значения температуры были бы -11.2 , -10.8 , и -10°C . Расхождения представляются большими для решения климатических задач.

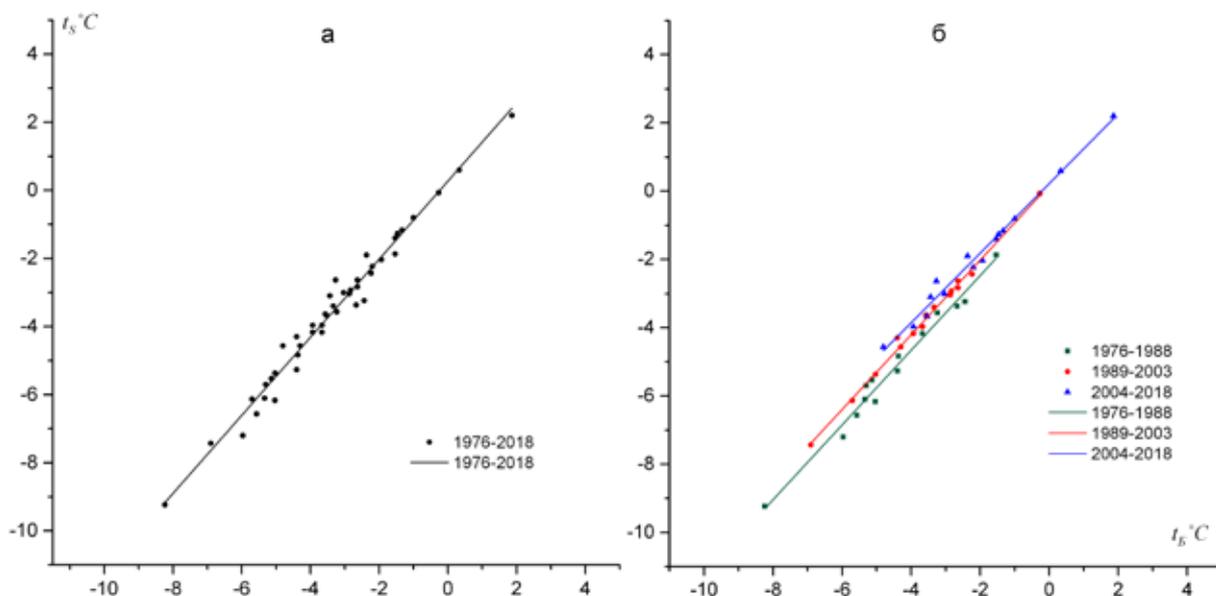


Рис. 9. Связь осенней (сентябрь–ноябрь) температуры воздуха на МС «Svalbard Airport» (t_S) и МС «Баренцбург» (t_B), 1976-2018 гг.

Проверим, есть ли статистически значимое различие между этими тремя линиями на рис. 11 б. Процедура сравнения наклонов нескольких регрессий подробно рассмотрена в [18]. Нулевая гипотеза: уравнения регрессии идентичны. Для проверки по всем уравнениям вычисляется общая сумма квадратов отклонений SS_t , объединённая остаточная оценка дисперсии SS_p , и рассчитывается параметр

$$F = \frac{\frac{(SS_t - SS_p)}{2(k-1)}}{\frac{SS_p}{DF_p}},$$

который сравнивается с критическим значением $F_{кр}$ для $2(k-1)$ и DF_p степеней свободы, где k – число регрессий.

Результаты расчёта представлены в таблице 7. Так как $F(4.38) = 17.1956 > 2.63$ ($\alpha = 0.05$), т.е. $F > F_{кр}$, нулевая гипотеза (уравнения регрессии идентичны) отклоняется. Если провести расширенную проверку, то окажется, что нет статистически значимого различия в углах наклона регрессии на рис. 9б, но есть статистически значимые различия в свободных членах регрессий.

Таблица 7. Параметры линейных регрессий, связывающих осеннюю температуру воздуха на МС и МС «Баренцбург», для разных периодов времени (описание обозначений приведено в тексте статьи).

Период	N	b	a	SS	DF
1975-1988	14	-0.2834	1.0949	0.8942	12
1989-2003	15	0.1700	1.0949	0.2143	13
2004-2018	15	0.2219	1.0199	0.6211	13
SSp				1.7297	38
SSt				4.8605	

Рассмотренный пример показывает, что использование регрессий, рассчитанных по коротким периодам (а нередко в работах ограничиваются всего несколькими годами параллельных измерений), для восстановления рядов в прошлом приводит к дополнительной ошибке, так как параметры этих регрессий могут менять свои численные значения на других временных интервалах из-за изменения макроциркуляционных условий. Данный факт свидетельствует в пользу использования оригинальных значений температуры воздуха на МС «Баренцбург» с 1932 г., вместо любого другого более короткого ряда на арх. Шпицберген, дополненного восстановленными значениями до 1932 г.

Выводы

Несмотря на переносы метеорологической площадки в Баренцбурге в 1978 и 1984 гг. принятые в климатологии статистические тесты не показывают признаков нарушения методической однородности в рядах температуры воздуха (средней месячной, среднемесячной минимальной и максимальной). Ряды температуры воздуха на ГМО «Баренцбург» можно использовать для решения задач региональной и глобальной климатологии за весь период наблюдений с 1932 г. Ряды на ГМО «Баренцбург» должны быть базовыми для оценок долговременных изменений климата на Шпицбергене и восстановления рядов на других МС, так как обладают наибольшей длиной среди всех других метеорологических станций архипелага., в том числе и по непрерывающейся серии (с 1947 г.).

Список литературы

1. Гольцберг И.А. Микроклимат СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 282 с
2. Демин В.И., Анциферова А.Р., Чаус О.М. Влияние микроклиматических условий на расчёты городского острова тепла и тренды температуры в Мурманске // Тр. Гидрометцентра РФ. 2017. 363. С. 160-175.
3. Демин В.И. О роли антропогенных и естественных факторов в оценке городского острова тепла // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5 С. 38-46 (в печати).
4. Иванов Б.В., Священников П.Н. Российская метеорология на Шпицбергене // Русский вестник Шпицбергена. 2012. № 12. С. 26-28.

5. Лобанов В.А., Жильцова Е.Л., Лемешко Н.А. Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2005. № 2. С. 5-14.
6. Руководство по специализированному обслуживанию экономики климатической информацией, продукцией и услугами / Под редакцией д-ра геогр. наук, профессора Н.В. Кобышевой. СПб. 2008. 336 с.
7. Alexandersson H.A homogeneity test applied to precipitation data // J. Climatol. 1986. N. 6. P. 661-675.
8. Ambrozova K. and Laska K. Air temperature variability in the vertical profile over the coastal area of Petuniabukta, central Spitsbergen // Pol. Polar Res. 38 (1). P. 41-60. 2017.
9. European Climate Assessment & Dataset (ECA&D). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)// ECA&D: Project number: EPJ029135. Royal Netherlands Meteorological Institute KNMI. Version : 10.7. 2013. Эл. док. Доступен по: <https://www.ecad.eu/documents/atbd.pdf>
10. Bingham C, Nelson LS. An approximation for the distribution of the Von Neumann ratio. *Technometrics*. 1981.23. pp. 285–288 .
11. Buishand, T.A. Some Methods for Testing the Homogeneity of Rainfall Records // *J. Hydrol.*1982. 58. P. 11-27.
12. Nordli Ø., Hanssen-Bauer I. & Førland E.J. Homogeneity analyses of temperature and precipitation series from Svalbard and Jan Mayen. *Klima* 16/96. Oslo: Norwegian Meteorological Institute.1996.
13. Nordli Ø. The Svalbard Airport temperature series. // *Bulletin of Geography, Physical Geography Series*. 2010. 3. P. 5-25.
14. Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A. E.J. & Isaksen K. Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898–2012 // *Polar Research*. 2014. 33. 21349. <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v33.21349>.
15. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem // *Journal of Applied Statistics*. 1979. 28. P. 126-135.
16. Rodionov, S.N., 2004: A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L09204, doi:10.1029/2004GL019448.
17. Von Neumann J. Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *Annals of Mathematical Statistics*.1941.12. P. 367-395.
18. Zar H.J. *Biostatistical Analysis*. Pearson. 2009. 946 p.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ, КРИСТАЛЛОХИМИЯ

Voytekhovsky Y.L., Stepenshchikov D.G. Scientific school of
crystallomorphology of St. Petersburg Mining University 5-16

Войтеховский Ю.Л., Степенщиков Д.Г. Научная школа
кристалломорфологии Санкт-Петербургского
Горного университета 17-28

Войтеховский Ю.Л., Степенщиков Д.Г. О простейших выпуклых
полиэдрах точечных групп комбинаторной симметрии
422, 4/*m*, -3, 6, 622, 6/*m*, *m*-3, 432 29-33

Войтеховский Ю.Л. Основная теорема кристаллографии 34-43

Коломейкина Е.В., Шутов А.В. О числе разбиений плоскости
на полимино или полигексы заданной площади 44-47

Кучериненко Я.В., Макаров В.С. Кристаллография многогранника
Иванова Q_1 48-56

Мокрова А.А., Малеев А.В., Шутов А.В. Координационные
последовательности графа usm 57-66

Степенщиков Д.Г., Чернявский А.В. Многогранники:
от матрицы к модели 67-74

Ярыгин О.Н. О нереализуемости определённого вида гранного
символа полиэдра 75-80

ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА, ГЕОХИМИЯ

Voytekhovsky Y.L. E.S. Fedorov's (mathematical) approach in analysis
of petrographic structures 82-87

Войтеховский Ю.Л. Фёдоровский (математический) подход
к анализу петрографических структур 88-94

Иванов А.С., Стегницкий Ю.Б., Феликс Т. Методика определения
в кимберлитах парастерезисов хромдиопсидов с пиропами 95-107

Ильченко В.Л. Механизм тектонического расслоения земной
оболочки, закон всемирного тяготения, эффект ССВ и
гравитационные волны 108-113

Каржавин В.К. Математическое подтверждение условий
образования алмазов 114-120

Ковалевский М.В. К вопросу о разработке пластинчатых преобразователей повернутых срезов с целью применения в задачах геофизики 121-126

Ковалевский М.В. К вопросу определения графических параметров в геофизических задачах акустоплярископии 127-132

БИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЯ

Демин В.И., Иванов Б.В. Проверка климатической однородности рядов температуры воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) 134-150

Еннэ А.И. Параметрический анализ чувствительности модели морской экосистемы 151-154

Штабровская И.М., Зенкова И.В. Анализ годичной динамики температуры горных почв с применением методов описательной статистики в высотном градиенте горы Куэльпорр 155-164

ФОТОРЕПОРТАЖ 165 -177