

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.46+551.32

DOI: 10.15372/KZ20210204

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ПЛОЩАДИ МОРСКИХ ЛЬДОВ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ В СВЯЗИ С ИЗМЕНЕНИЯМИ ХАРАКТЕРИСТИК ИНСОЛЯЦИИ

В.М. Федоров, П.Б. Гребенников

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; fedorov.msu@mail.ru

Выполнен корреляционный анализ многолетней динамики площади морских льдов в Северном полушарии с характеристиками инсоляции, рассчитанными с высоким пространственным разрешением. Для периода 1901–2018 гг. найдены тесные отрицательные связи многолетних изменений площади морских льдов в ячейках размером $1^\circ \times 1^\circ$ с зимней инсоляцией и инсоляционной контрастностью. Построены карты распределения тесноты связи многолетних изменений площади морских льдов с характеристиками инсоляции для средних годовых, полугодовых и месячных (март, сентябрь) значений площади морских льдов. Показано, что связь многолетних изменений распространения морских льдов в Северном полушарии с инсоляционной контрастностью является причинно-следственной и инсоляционная контрастность может быть предиктором в статистических моделях динамики морских льдов. Определено, что на всем протяжении Северный морской путь характеризуется тесными связями распространения морских льдов с инсоляционной контрастностью. Это создает перспективу долгосрочного прогнозирования площади распространения морских льдов для Северного морского пути на основе выполненных для будущих десятилетий расчетов инсоляционной контрастности Северного полушария.

Площадь морских льдов, сезонная, межгодовая и многолетняя изменчивость, инсоляция, инсоляционная контрастность, корреляционный анализ, Северный морской путь, солярная теория климата

IMPLICATIONS OF CHANGES IN INSOLATION CHARACTERISTICS FOR LONG-TERM SEA ICE EXTENT DYNAMICS IN THE NORTHERN HEMISPHERE

V.M. Fedorov, P.B. Grebennikov

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia; fedorov.msu@mail.ru

A correlation analysis of long-term dynamics of sea ice extent in the Northern Hemisphere involving calculations of insolation characteristics with high spatial resolution was performed. The revealed close negative relationships between multi-year variations in sea ice extent, winter insolation and irradiance contrast were calculated in model cells with resolution of $1^\circ \times 1^\circ$ for the period 1901–2018. The linkage density maps have been constructed to analyze relationships between multi-year changes in sea ice extent and insolation characteristics based on annual, semi-annual and monthly (March, September) means of sea ice extent. It is revealed that the correlation between multi-year variations in sea ice spatial distribution in the Northern Hemisphere and insolation contrast is interpreted as cause and effect relationship, while insolation contrast can be used as a predictor in statistical models for the sea ice extent dynamics. A close relationship between spatial distribution of sea ice and insolation contrast throughout the entire Northern Sea Route has been determined. This gives a perspective for long-term forecasting of the sea ice extent for the Northern Sea Route based on calculations of the intensity of insolation contrast for the Northern Hemisphere.

Sea ice extent, seasonal, interannual and multi-year variability, insolation, insolation contrast, correlation analysis, Northern Sea Route, solar climate theory

ВВЕДЕНИЕ

Распространение морских льдов зависит от многих факторов, определяемых геофизическими процессами. Это прежде всего температура и влажность воздуха, температура поверхности океана, облачность, сток рек, альbedo и др. Однако энергетическую основу этих факторов, а также циркуляционных процессов в атмосфере и океане

составляет приходящая к Земле солнечная радиация – основной источник энергии гидрометеорологических процессов. Следствием нерегулярности поступления во времени и неравномерного распределения в пространстве солнечной радиации являются механизмы теплообмена (“тепловая машина первого и второго рода”). Из-за неодно-

родности компонентов природной среды образуются механизмы теплообмена между атмосферой, океаном и морским льдом. Из этого следует значимость радиационного фактора в динамике распространения морских льдов и необходимость определения связи между этими переменными. Это также актуально для совершенствования методов прогнозирования распространения морских льдов в условиях меняющегося климата. Прогноз распространения морских льдов имеет важное значение при долгосрочном планировании стратегии использования Северного морского пути и социально-экономического развития арктических регионов [Федоров, 2015; Федоров, Гребенников, 2018].

На распространение площади морских льдов (дрейф) оказывают влияние морские течения и приливы, связанные с гравитационным взаимодействием Земли с Луной и Солнцем. Это влияние в данной работе не рассматривается.

Целью работы является определение корреляционной и причинно-следственной связей многолетних изменений площади морских льдов с характеристиками инсоляции Северного полушария с большим пространственным разрешением. Эти исследования являются одним из блоков разрабатываемой авторами статистической модели распространения морского льда в Северном полушарии. Два других блока статистической модели будут включать связи сезонной и межгодовой изменчивости площади морских льдов с характеристиками инсоляции. В результате будет оцениваться влияние инсоляционного фактора на динамику площади морских льдов и возможности моделирования и прогноза распространения морских льдов с учетом как сезонных, так межгодовых и многолетних изменений характеристик инсоляции, рассчитанных с высоким пространственным и временным разрешением в будущее. Кроме инсоляционных факторов, предполагается учесть влажность воздуха и другие параметры на основе многофакторного уравнения множественной регрессии. Разработка специализированной статистической модели распространения морских льдов актуальна и оправдана, учитывая проблемы, отмеченные для физико-математических моделей, в которых морские льды представляют собой один из фрагментов моделирования климата [Федоров, 2019а, б].

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исходных данных о площади морских льдов использовалась база данных Метеорологического центра Хедли (Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Office, UK) HadISST1 (Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature data set) [<http://www.metoffice.gov.uk/...html>].

Представленная в базе данных HadISST1 информация о средней месячной температуре поверхности океана (ТПО) и площади морских льдов в Северном и Южном полушариях получена в результате сведения в единый массив данных реанализа (ERA40), выполненного с использованием эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) и данных инструментальных (прежде всего судовых и спутниковых) наблюдений. Реконструкция площади морских льдов в массиве по сетке $1^\circ \times 1^\circ$ выполнена на основе алгоритмов аппроксимации и экстраполяции доступных данных (оцифрованные карты площади морских льдов, данные судовых и спутниковых наблюдений) с учетом ТПО [Rayner et al., 2003]. Так как характеристики инсоляции рассчитаны авторами в будущее, определение тесных корреляционных и причинно-следственных связей представляется возможной основой для статистических и вероятностных прогнозов изменения площади морских льдов.

Исходные данные, содержащие информацию о площади морских льдов (HadISST1), представлены в нескольких текстовых файлах, которые были объединены авторами в единый массив в формате Excel. Массив представлял собой данные по площади морских льдов Северного полушария в пространственной ячейке $1^\circ \times 1^\circ$, в процентах от площади ячейки. Всего собранный таким образом массив охватывал около 7400 ячеек, в каждой из которых представлена информация о площади морского льда с месячными значениями за период с 1901 по 2018 г. Массив полностью заполнен месячными значениями (пропусков нет). По месячным значениям рассчитывались средние годовые (как средние по всем месяцам года) и полугодовые (как средние по месяцам с апреля по сентябрь для летнего полугодия и с октября по март для зимнего полугодия) значения площади морских льдов.

Выполнен анализ значений площади морских льдов в широтном диапазоне от 90° до 42° с.ш. Нижние граничные условия нами приняты на основе характерного 0.5%-го среднемноголетнего значения годовой площади морских льдов в ячейке на широте 42° . В более низких широтах среднее многолетнее значение не превышает 0.5 % от площади ячейки. Для 42° с.ш. среднее многолетнее значение площади ячейки, занятой морскими льдами, превышает 0.5 % (0.556 %). Для 41° с.ш. площадь льда в среднем за период 1901–2018 гг. составляет 0.278 % (рис. 1). По полугодиям и месяцам характер распределения сохраняется, но широтный диапазон с ячейками, в которых средняя площадь льда превышает 0.5 %, изменяется. В зимнее полугодие параметры нижних значений площади морских льдов тождественны годовым. В летнее полугодие на широте 43° средняя для ячейки площадь, занятая льдами, составляет 1.389 % от площади ячейки. Южнее в этот период

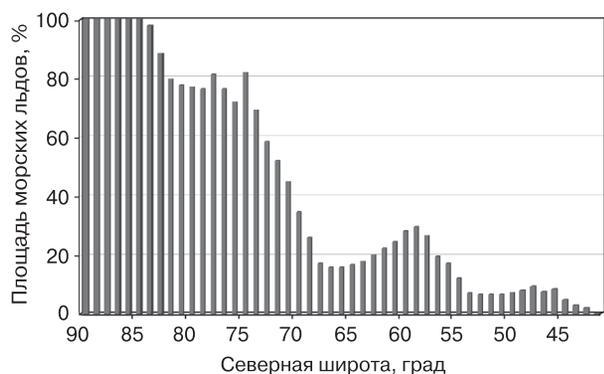


Рис. 1. Распределение по географическим широтам средней многолетней площади морских льдов в марте за период с 1901 по 2018 г. в ячейке $1^\circ \times 1^\circ$.

морские льды не распространяются. В марте диапазон (по граничному значению 0.5 %) анализируемых значений составляет $90-42^\circ$ с.ш., для сентября $90-54^\circ$ с.ш. (в сентябре отмечаемый на рис. 1 пик в районе $55-65^\circ$ с.ш. исчезает). Таким образом, исключались ячейки, приходящиеся на моря, не покрываемые льдом в период 1901–2018 гг. По данным из этих диапазонов проводился анализ результатов и составлена табл. 1.

В качестве исходных характеристик инсоляции Северного полушария использовались рассчитанные ранее значения: 1) приходящей за год, за летнее и зимнее полугодия солнечной радиации ($\text{Дж}/\text{м}^2$, $\text{Вт}/\text{м}^2$); 2) сезонность – разность между приходящей в летнее и зимнее полугодия солнечной радиации ($\text{Дж}/\text{м}^2$, $\text{Вт}/\text{м}^2$); 3) годовая инсоляционная контрастность ($\text{Вт}/\text{м}^2$) [Федоров, Костин, 2019]. Инсоляционная контрастность (ИК) определялась как разность инсоляции области источника тепла ($0-45^\circ$ с.ш.) и области стока тепла ($45-90^\circ$ с.ш.). Обобщенно (по областям источника и стока тепла) ИК отражает изменение меридионального градиента инсоляции, регулирующего перенос тепла из экваториальной и тропической областей в полярные районы, – работу “тепловой машины первого рода” [Шулейкин, 1953; Федоров, 2018].

Проводился корреляционный анализ многолетних рядов (продолжительностью 118 лет) средних годовых, полугодовых и месячных (март, сентябрь) значений площади морского льда в каждой ячейке $1^\circ \times 1^\circ$ с характеристиками инсоляции Северного полушария. С использованием геоинформационных технологий были построены карты значений коэффициента корреляции, отражающие тесноту связи площади распространения морских льдов с характеристиками инсоляции. Возможные погрешности в корреляционном анализе связаны с хронологическим несопадением календарного года, полугодий и месяцев, для которых

Таблица 1. Распределение значений коэффициента корреляции многолетних изменений площади морских льдов с характеристиками инсоляции Северного полушария (%)

| Коэффициент корреляции | Инсоляция, $\text{Дж}/\text{м}^2$ | | Сезонность инсоляции, $\text{Дж}/\text{м}^2$ | Инсоляционная контрастность, $\text{Вт}/\text{м}^2$ |
|-------------------------|-----------------------------------|--------|--|---|
| | летняя | зимняя | | |
| <i>Летнее полугодие</i> | | | | |
| < -0.9 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| < -0.8 | 0.00 | 0.38 | 0.00 | 0.64 |
| < -0.7 | 0.04 | 6.42 | 0.07 | 7.63 |
| < -0.6 | 0.23 | 21.23 | 0.22 | 23.68 |
| < -0.5 | 0.49 | 41.58 | 0.52 | 43.68 |
| > 0.5 | 42.41 | 0.48 | 43.19 | 0.53 |
| > 0.6 | 23.23 | 0.22 | 23.70 | 0.22 |
| > 0.7 | 6.77 | 0.03 | 7.25 | 0.07 |
| > 0.8 | 0.53 | 0.00 | 0.67 | 0.00 |
| > 0.9 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| <i>Зимнее полугодие</i> | | | | |
| < -0.9 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| < -0.8 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| < -0.7 | 0.45 | 0.94 | 0.46 | 1.44 |
| < -0.6 | 0.73 | 6.80 | 0.78 | 8.28 |
| < -0.5 | 1.16 | 21.12 | 1.13 | 23.55 |
| > 0.5 | 22.04 | 1.12 | 23.12 | 1.14 |
| > 0.6 | 7.86 | 0.75 | 8.10 | 0.78 |
| > 0.7 | 1.16 | 0.42 | 1.32 | 0.48 |
| > 0.8 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| > 0.9 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| <i>Март</i> | | | | |
| < -0.9 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| < -0.8 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| < -0.7 | 0.38 | 0.22 | 0.39 | 0.41 |
| < -0.6 | 1.20 | 2.84 | 1.30 | 3.46 |
| < -0.5 | 3.41 | 9.47 | 3.50 | 10.38 |
| > 0.5 | 9.90 | 3.25 | 10.11 | 3.39 |
| > 0.6 | 3.34 | 1.20 | 3.40 | 1.30 |
| > 0.7 | 0.34 | 0.34 | 0.41 | 0.41 |
| > 0.8 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| > 0.9 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| <i>Сентябрь</i> | | | | |
| < -0.9 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| < -0.8 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 |
| < -0.7 | 0.00 | 0.92 | 0.00 | 2.45 |
| < -0.6 | 0.00 | 14.33 | 0.00 | 16.45 |
| < -0.5 | 0.07 | 30.81 | 0.07 | 32.11 |
| > 0.5 | 32.41 | 0.07 | 32.49 | 0.07 |
| > 0.6 | 16.52 | 0.00 | 16.84 | 0.00 |
| > 0.7 | 2.11 | 0.00 | 2.20 | 0.00 |
| > 0.8 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| > 0.9 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

имеются значения площади морских льдов, с тропическим годом, полугодиями и месяцами, для которых рассчитывались инсоляционные характеристики. Тропический год – промежуток времени между прохождением Землей последовательных точек весеннего равноденствия. Оценка и значимость линейного коэффициента корреляции при выполнении корреляционного анализа определялись в соответствии с существующими методиками [Цымбаленко и др., 2007].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обнаружены тесные корреляционные связи многолетних изменений площади морских льдов (годовых, полугодовых и месячных) с летней и зимней инсоляцией Северного полушария ($\text{Дж}/\text{м}^2$), сезонностью инсоляции ($\text{Дж}/\text{м}^2$) и годовой инсоляционной контрастностью ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Корреляция многолетних изменений годовых (средних за зимнее и летнее полугодия) значений площади морских льдов с многолетними изменениями летней инсоляции характеризуется в основном положительными значениями (рис. 2). Все значения коэффициента корреляции статистически значимы с вероятностью 0.99. Из 7416 значений коэффициента корреляции (R) многолетних изменений годовой площади морских льдов с летней инсоляцией Северного полушария 541 (7.30 %) – отрицательные и 6875 (92.70 %) – положительные (см. рис. 2). Положительные значения, превышающие 0.5, имеют 70.16 %, а 42.98 % превышают значения $R = 0.6$; 19.82 % превышают значения $R = 0.7$ и 2.27 % имеют $R > 0.8$ (см. табл. 1).

Корреляция многолетних изменений годовой площади морских льдов с многолетними изменениями зимней инсоляции характеризуется в основном отрицательными значениями. Отрицательных значений коэффициента корреляции 6895 (92.97 %), положительных – 521 (7.03 %). Отрицательные значения имеют 68.46 % ($R < -0.5$), 40.17 % ($R < -0.6$), 18.18 % ($R < -0.7$) и 1.35 % ($R < -0.8$).

Корреляция многолетних изменений годовой площади морских льдов с сезонностью инсоляции характеризуется в основном положительными значениями (см. рис. 2). Из 7416 значений R положительных 6884 (92.83 %) и отрицательных 531 (7.17 %). Положительные значения, превышающие 0.5, имеют 70.73 %, а 44.27 % превышают значения $R = 0.6$; 20.60 % имеют $R > 0.7$ и 2.36 % значений имеют $R > 0.8$.

Корреляция многолетних изменений годовой площади морских льдов с многолетними изменениями инсоляционной контрастности характеризуется в основном отрицательными значениями. Из 7416 значений коэффициента корреляции 6901 (93.06 %) – отрицательные и 515 (6.94 %) – поло-

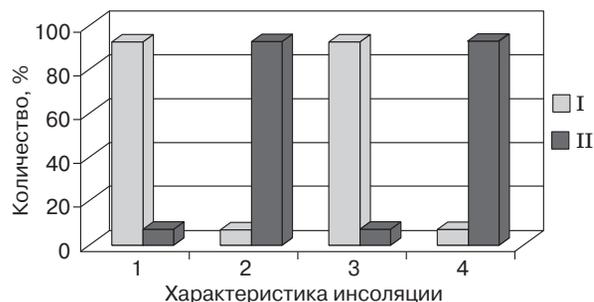


Рис. 2. Соотношение положительных (I) и отрицательных (II) значений коэффициента корреляции годовой площади морских льдов:

1 – с летней инсоляцией, 2 – с зимней инсоляцией, 3 – с сезонностью инсоляции, 4 – с инсоляционной контрастностью Северного полушария.

жительные. Отрицательные значения получены для 71.79 % ($R < -0.5$), 44.70 % ($R < -0.6$), 21.14 % ($R < -0.7$) и 2.37 % ($R < -0.8$).

Показатели корреляции полугодовых, мартовских и сентябрьских значений площади морских льдов представлены в табл. 1. В летнем полугодии значения коэффициента корреляции получены для 7324 ячеек, в зимнем – для 7354, в марте – для 7149, в сентябре – для 6079 ячеек.

В многолетних изменениях годовых значений площади морских льдов тесная корреляционная связь с характеристиками инсоляции отмечается в обширной арктической области, включающей море Баффина, Гудзонов пролив, бассейн Фокс, северную часть Гудзонова залива, многие проливы Канадского арктического архипелага (Ланкастер, Барроу и др.), Гренландское и Баренцево моря, западную часть Карского моря, море Лаптевых и западную часть Восточно-Сибирского моря, Чукотское море и северную часть Берингова моря, западную часть моря Бофорта (рис. 3).

Проведен поиск причинно-следственных зависимостей в пуле найденных тесных корреляционных связей. Как отмечалось, положительная связь многолетних изменений площади морских льдов (годовых, полугодовых и месячных) обнаружена с летней инсоляцией и сезонностью инсоляции. Отрицательная связь отмечается с зимней инсоляцией и инсоляционной контрастностью. Однако все эти характеристики инсоляции тесно связаны между собой, а следовательно, не являются независимыми переменными. Так, коэффициент корреляции ИК с летней инсоляцией в интервале с 1901 по 2018 г. составляет -0.950 , с зимней инсоляцией 0.994 , с сезонностью -0.985 . Все эти характеристики линейно связаны с уменьшением наклона оси вращения Земли [Федоров, 2018].

Рассмотрим возможные климатические эффекты, относящиеся к найденным связям.

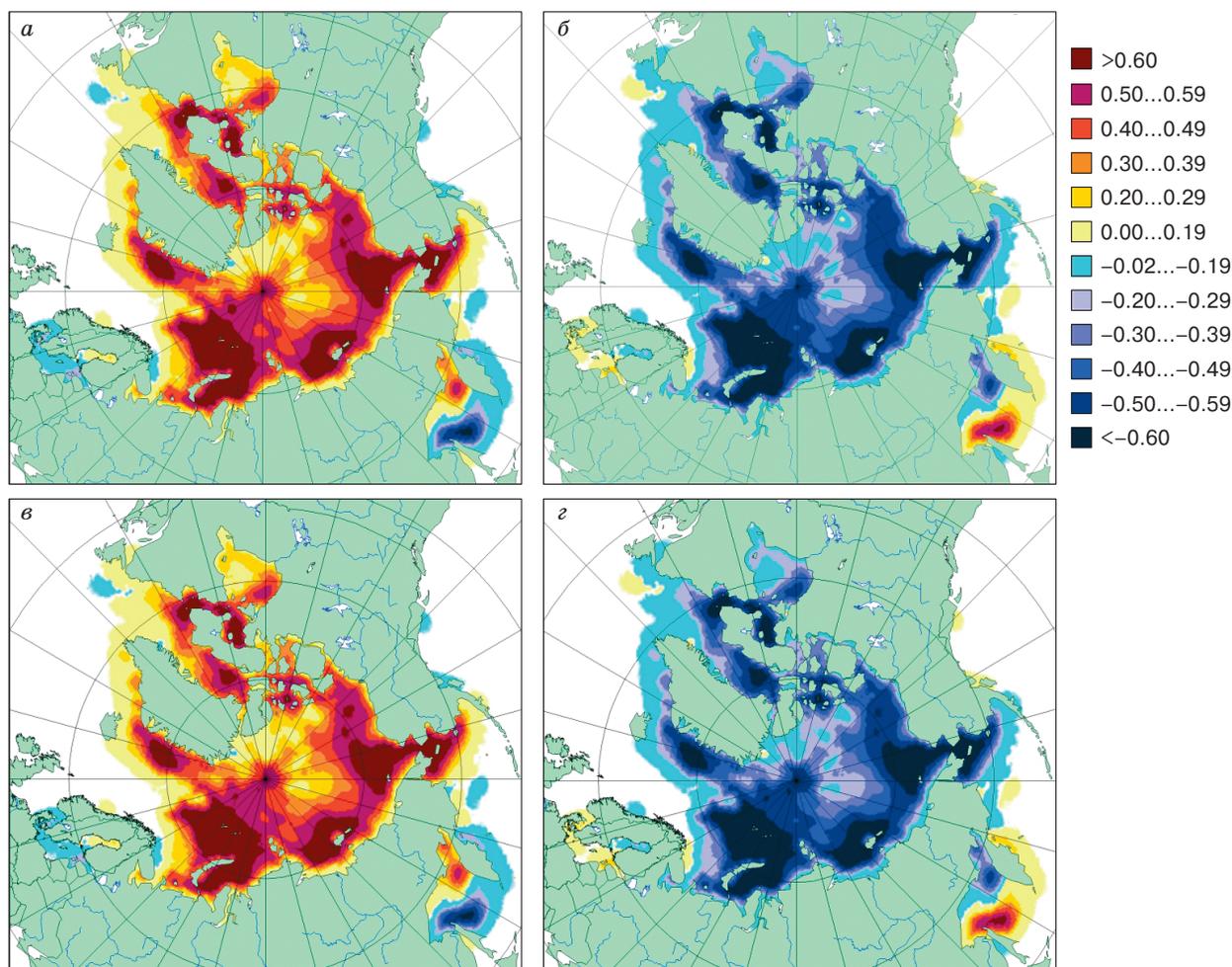


Рис. 3. Распределение коэффициента корреляции многолетних изменений годовой площади морских льдов с характеристиками инсоляции:

а – летней инсоляцией, *б* – зимней инсоляцией, *в* – сезонностью инсоляции, *з* – инсоляционной контрастностью Северного полушария.

Следствием увеличения инсоляции (зимней или летней) должно быть и сокращение площади морских льдов в этом сезоне (в результате инерции этот эффект может проявляться в обоих сезонах с некоторой задержкой во времени). В случае сокращения приходящей радиации можно ожидать обратного эффекта. В исследуемый период отмечается сокращение как годовой, так и летней инсоляции, тем не менее наблюдается сокращение годовой и летней площади морских льдов. Следовательно, отмеченные для летней инсоляции положительные связи с изменением площади морских льдов являются корреляционными, так как, исходя из физических представлений, увеличению летней инсоляции должно соответствовать сокращение площади морских льдов. И наоборот, при сокращении летней инсоляции – увеличение площади их распространения. Зимняя инсоляция в

указанный период увеличивается и может быть фактором многолетних изменений площади морских льдов.

Положительная связь многолетних изменений площади морских льдов обнаружена с сезонностью инсоляции. Для сезонности инсоляции в исследуемый период также отмечается тенденция к уменьшению [Федоров, Фролов, 2020]. Эта тенденция определяется сокращением летней инсоляции. Известно, что летняя инсоляция имеет важное значение в генезисе климата и его изменениях, с которыми тесно связаны образование и эволюция морских льдов. Это определяется, во-первых, тем, что при росте летней инсоляции увеличиваются испарение и содержание водяного пара в атмосфере, что приводит к усилению парникового эффекта. Во-вторых, выделение тепла связано с увеличением атмосферных осадков (переход во-

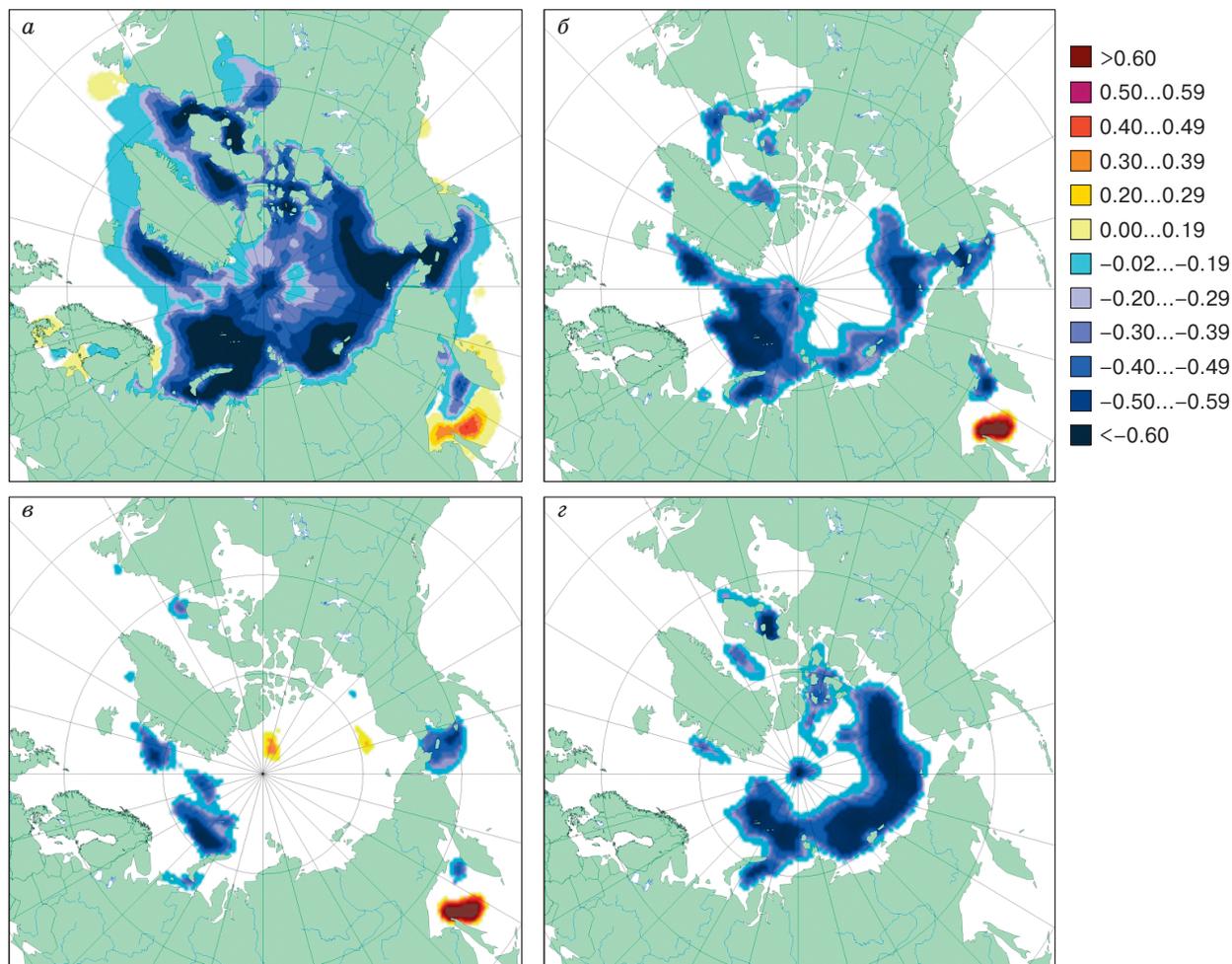


Рис. 4. Распределение коэффициента корреляции многолетних изменений площади морских льдов и инсоляционной контрастности в Северном полушарии:

a – летнее полугодие, *б* – зимнее полугодие, *в* – март, *з* – сентябрь.

дяного пара в воду и снег). В-третьих, из-за уменьшения альбедо за счет сокращения площади морских льдов и ледников увеличивается нагревание поверхности (материков и океанов) и от нее атмосферы. При сокращении летней инсоляции, очевидно, происходят обратные процессы. Поэтому, исходя из изложенных выше физических представлений, положительную связь многолетних изменений площади морских льдов с сезонностью инсоляции, характерную для исследуемого периода, следует также считать корреляционной. Тесная отрицательная связь многолетних изменений площади морских льдов (для годовых, полугодовых и месячных значений) получена с инсоляционной контрастностью (см. рис. 2, 4). В летнее полугодие тесные корреляционные связи многолетней площади морских льдов и инсоляционной контрастности отмечаются на обширной территории Северного полушария. В зимнее полугодие

ареал тесных связей заметно сокращается. Отсутствуют отклики на многолетние изменения ИК в центральной части Северного Ледовитого океана, где за этот период отмечаются минимальные изменения площади морских льдов. Однако тесная связь проявляется в отдельных окраинных и прибрежных районах (Гренландское море, северная часть Баренцева и Карского морей, Чукотское море, западная часть моря Бофорта, северная часть Берингова моря, Гудзонов пролив, залив Шелихова в Охотском море). В марте тесные связи отмечаются лишь в Гренландском море, на севере Баренцева и Берингова морей. Это время характеризуется максимальным распространением морского льда в Северном полушарии с малой для этого месяца многолетней изменчивостью площади ледового покрова. В сентябре тесная связь отмечается для всех морей российской Арктики, моря Бофорта и бассейна Фокса. Распространение ле-

дового покрова в этих районах в данный период подвержено наибольшему многолетним изменениям [Морской лед, 1997; Ледяные образования..., 2006]. Полученные для сентября тесные корреляционные связи многолетних изменений площади морских льдов для морей российской Арктики с ИК представляет основу для долгосрочного прогнозирования изменений распространения площади морских льдов на всем протяжении Северного морского пути в летний период (см. рис. 4, з).

Рассмотрим возможное физическое объяснение найденной связи многолетних изменений площади морских льдов с инсоляционной контрастностью. Из-за неравномерности в распределении солнечной радиации на поверхности Земли возникает меридиональный градиент инсоляции (МГИ). Ранее авторами получен широтный профиль изменения годового МГИ за период с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. [Федоров, 2018]. Максимумы увеличения МГИ локализованы вблизи полярных кругов (широта 60–70° – годовые “зоны турбулентности”). Годовые “зоны турбулентности” совпадают с районами максимального развития внутритропических циклонов (циклогенеза) в полушариях [Погосян, 1976]. Увеличение годового МГИ приходится на области расположения циркуляционных ячеек Хэдли и Ферреля в атмосфере, уменьшение – на области полярных ячеек. Таким образом, изменением МГИ определяются особенности как циркуляционной, так и вихревой активности в атмосфере. Также определены многолетние изменения МГИ для зимнего и летнего полугодий. Значения МГИ максимально увеличиваются в зимнее (для Северного полушария) полугодие в зоне 15–20° ю.ш. (11.8 %) и максимально сокращаются в зоне 10–15° ю.ш. (17.8 %). В летнее (для Северного полушария) полугодие максимальное увеличение (11.8 %) отмечается в зоне 10–15° с.ш., максимальное сокращение (17.8 %) – в зоне 5–10° с.ш. [Федоров, 2018, 2019в].

В летнее полугодие в полушариях выделяются сезонные “зоны турбулентности”, расположенные в диапазоне 5–20° широты. Здесь в соседних пятиградусных широтных зонах отмечаются максимальные расхождения в тенденциях изменения летнего МГИ. Сезонные “зоны турбулентности” совпадают с областями генерации тропических циклонов (80 % которых формируется в пределах 10–20° широты). С вихревым переносом энергии связана работа “тепловой машины первого рода”, механизм меридионального переноса тепла из низких широт в высокие [Шулейкин, 1953]. В полярных областях (полярные циркуляционные ячейки) в зимние полугодия в полушариях отмечается увеличение МГИ, в летние полугодия – сокращение.

Полученное среднее распределение годового МГИ сравнивалось с меридиональным распреде-

лением среднего годового переноса энергии в системе “океан–атмосфера”, приведенным в работах [Лоренц, 1970; Пальмен, Ньютон, 1973]. Коэффициент корреляции между средними значениями годового МГИ (рассчитанный по средним многолетним значениям инсоляции пятиградусных широтных зон за период 1900–2018 гг.) и значениями переноса энергии в системе “океан–атмосфера” составил 0.98 (линейная связь). При этом численные значения переноса энергии в системе “океан–атмосфера” в работах [Лоренц, 1970; Пальмен, Ньютон, 1973] в среднем в 6–7 раз превышают значения МГИ, что может быть связано с участием в переносе энергии в системе “океан–атмосфера” водных и воздушных масс. В более поздних работах значения переноса энергии приблизительно в 3 раза превышают значения годового МГИ [Peixoto, Oort, 1984].

Поскольку перенос энергии в системе “океан–атмосфера” определяется МГИ, полученные для него особенности могут проявляться и в системе “океан–атмосфера” (возрастание или ослабление интенсивности циркуляции в ячейках общей циркуляции атмосферы, усиление или ослабление вихревого переноса энергии и климатической изменчивости). Отмечаемые для современной эпохи особенности соларного климата Земли связаны с уменьшением наклона оси вращения Земли в результате прецессии [Миланкович, 1939; Федоров, 2018, 2019а,в].

Ранее в результате корреляционного анализа нами определена связь многолетних изменений аномалий приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и температуры поверхности океана (ТПО) для Земли, Мирового океана и полушарий с многолетними изменениями годовой инсоляционной контрастности [<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature>]. Температурный режим, как отмечалось ранее, – основной фактор формирования и динамики распространения морских льдов. Обобщенно (по областям источника и стока тепла) ИК отражает изменение МГИ. Многолетние изменения МГИ и ИК определяются изменением угла наклона оси вращения Земли в результате прецессии и нутации [Федоров, 2018, 2019в].

Изменения ПТВ и ТПО Земли и полушарий (данные университета Восточной Англии и метеобюро Хэдли) в основном учитываются трендами [Федоров, 2018]. Значения коэффициента детерминации составляют от 0.693 до 0.862 (тренды – полиномы второй степени). Коэффициент детерминации показывает долю изменений ПТВ и ТПО, определяемую трендом. Следовательно, чтобы объяснить тенденции многолетних изменений глобальной температуры, надо найти фактор, определяющий тренды многолетних изменений ПТВ и ТПО. Анализ показывает, что многолетние изменения ПТВ и ТПО Земли и полушарий ха-

рактируются тесными положительными корреляционными связями с многолетними изменениями ИК и отрицательными – с многолетними изменениями угла наклона оси. Выполненные по уравнению регрессии (по ансамблю линейных и полиномиальных решений) расчеты показали, что многолетние изменения ПТВ и ТПО связаны в основном с многолетними изменениями годовой инсоляционной контрастности, усиленными положительными обратными связями (табл. 2), как показано ниже.

Физический механизм найденной авторами тесной корреляционной связи многолетних изменений площади морских льдов в Северном полушарии с инсоляционной контрастностью (солярная теория климата) в обобщенном виде сводится к следующему. Связанное с уменьшением угла наклона увеличение ИК, управляющее меридиональным переносом тепла или интенсивностью работы “тепловой машины первого рода”, приводит к увеличению переноса тепла (циркуляционными процессами в атмосфере и вихревыми образованиями) из низких широт в высокие. В результате этого температура поверхности океана и приповерхностная температура воздуха повышаются. Это приводит к увеличению испарения и повышению содержания водяного пара в атмосфере и усилению парникового эффекта, результатом является дополнительное повышение температуры и т. д. Этот процесс, постоянно повторяясь, усиливает потепление климата в Северном полушарии и приводит к сокращению площади морских льдов. Кроме того, в результате конденсации из-за адвекции теплых воздушных масс в высокие широты также выделяется тепло, которое вносит дополнительный вклад в схему радиационного теплообмена в атмосфере (рис. 5).

Три нижних блока в схеме отражают механизм усиления процесса потепления в Арктике и сокращения площади морских льдов (см. рис. 5). Также следует учитывать положительные обратные связи – уменьшение альбедо из-за многолетнего сокращения площади морских льдов и усиление парникового эффекта из-за дегазации многолетнемерзлых пород в связи с потеплением климата [IPCC, 2013]. Таким образом, подтверждаются и естественные причины изменения совре-

менного глобального климата. Основной из них является изменение наклона оси вращения Земли, регулирующее распределение приходящей к Земле солнечной радиации по широтам и сезонам и интенсивность меридионального теплообмена (работы “тепловой машины первого рода”) [Шулейкин, 1953].

С учетом приведенного физического объяснения найденная тесная корреляционная связь многолетних изменений годовых, полугодовых и месячных значений площади морских льдов с ИК Северного полушария может считаться причинно-следственной. Таковой может считаться и связь многолетних изменений площади морских льдов с зимней инсоляцией (ее увеличению соответствует сокращение площади морских льдов). Зимняя инсоляция в период 1901–2018 гг. увеличивается на 0.020 %, в то время как ИК возрастает на 0.048 %, т. е. вклад ИК в многолетние изменения площади морских льдов более значим, чем эффект, связанный с увеличением зимней инсоляции. Кроме того, как следует из описания климатического эффекта ИК, он проявляется в течение всего года (сезонов, месяцев). Зимняя же инсоляция – сезонный фактор. При этом изменчивость площади морских льдов в основном приходится на летнее полугодие. Поэтому в статистической модели (с учетом тесной связи ИК и зимней инсоляции и

Таблица 2. Многолетние изменения (%) приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и температуры поверхности океана (ТПО), объясняемые регрессионной моделью

| Территория | ПТВ | ТПО |
|----------------------|------|------|
| Земля, Мировой океан | 80.7 | 79.7 |
| Северное полушарие | 73.4 | 69.3 |
| Южное полушарие | 83.1 | 84.1 |

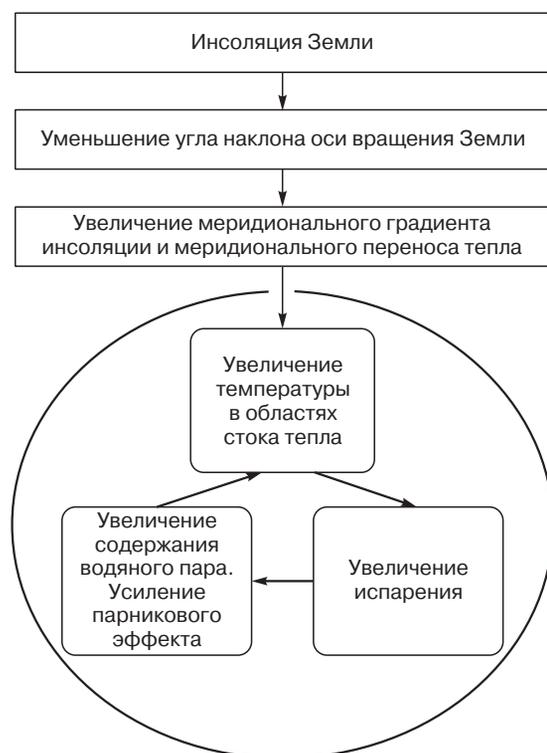


Рис. 5. Принципиальная схема радиационного теплообмена в атмосфере.

их линейной зависимости от угла наклона оси) следует использовать ИК в качестве предиктора при прогнозировании многолетних изменений площади морских льдов. Однако представляется необходимым также получение количественных характеристик совместного влияния этих факторов (ИК и зимней инсоляции) на тенденции изменения площади морских льдов в Северном полушарии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Найдена причинно-следственная связь многолетних изменений годовых, полугодовых и месячных значений площади морских льдов с характеристиками инсоляции – зимней инсоляцией и инсоляционной контрастностью Северного полушария – в масштабе высокого пространственного разрешения. Характеристики инсоляции линейно связаны с наклоном оси вращения Земли и тесно связаны между собой, поэтому не являются независимыми параметрами, что исключает возможность использования модели двухфакторной (зимняя инсоляция и ИК) множественной регрессии. В связи с большим размахом изменений ИК эта характеристика, с учетом связанного с ней физического механизма изменений климата, принимается в качестве одного из предикторов в разрабатываемой статистической модели площади морских льдов. Таким образом, в модели будут учтены многолетние изменения в площади морских льдов, связанные с изменениями меридионального градиента инсоляции и меридионального переноса тепла. Многолетние изменения площади морских льдов, связанные с вариациями в приходе солнечной радиации (в том числе в зимнее полугодие), будут учитываться в блоке связей в годовом ходе инсоляции с годовым ходом изменения площади морских льдов в ячейках. Третий блок предполагает учет связей межгодовых изменений площади морских льдов с межгодовыми изменениями характеристик инсоляции. Отдельные блоки и алгоритмическая схема (архитектура) статистической модели морских льдов будут приведены в последующих работах.

Полученные для сентября тесные корреляционные связи многолетних изменений площади морских льдов для морей российской Арктики с ИК представляют основу для прогнозирования изменений распространения площади морских льдов на всем протяжении Северного морского пути в летний период.

Работа выполнена в соответствии с государственной темой “Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики”.

Литература

- Ледяные образования морей западной Арктики** / Ред. Г.К. Зубакин. СПб., ААНИИ, 2006, 272 с.
- Лоренц Э.Н.** Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1970, 260 с.
- Миланкович М.** Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.; Л., ГОНТИ, 1939, 208 с.
- Морской лед** / Под ред. И.Е. Фролова, В.П. Гаврило. СПб., Гидрометеиздат, 1997, 402 с.
- Пальмен Э.** Циркуляционные системы атмосферы / Э. Пальмен, Ч. Ньютон. Л., Гидрометеиздат, 1973, 616 с.
- Погосян Х.** Циклоны. Л., Гидрометеиздат, 1976, 148 с.
- Федоров В.М.** Тенденции изменения площади морских льдов в Северном полушарии и их причины // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 3, с. 52–64.
- Федоров В.М.** Солнечная радиация и климат Земли. М., Физматлит, 2018, 232 с.
- Федоров В.М.** Вариации инсоляции Земли и особенности их учета в физико-математических моделях климата // Успехи физ. наук, 2019а, т. 189, № 1, с. 33–46.
- Федоров В.М.** Комментарии к статье С.П. Позднякова, С.О. Гриневского, Е.А. Дедюлиной “Влияние климатических изменений на многолетнюю динамику сезонного промерзания в Московском регионе: ретроспективный анализ и неопределенности прогноза на вторую половину XXI века” // Криосфера Земли, 2019б, т. XXIII, № 4, с. 36–43.
- Федоров В.М.** Проблема меридионального переноса тепла в астрономической теории климата // Геофиз. процессы и биосфера, 2019в, т. 18, № 3, с. 117–128.
- Федоров В.М., Гребенников П.Б.** Инсоляционная контрастность Земли и изменение площади морских льдов в Северном полушарии // Арктика: экология и экономика, 2018, № 4 (32), с. 86–94.
- Федоров В.М., Костин А.А.** Вычисление инсоляции Земли для периода от 3000 г. до н.э. до 2999 г. н.э. // Процессы в геосредах, 2019, № 2, с. 254–262.
- Федоров В.М., Фролов Д.М.** Малый ледниковый период в жизни Земли и его возможные причины // Жизнь Земли, 2020, т. 42, № 1, с. 4–12.
- Цымбаленко Т.Т.** Методы математической статистики в обработке экономической информации / Т.Т. Цымбаленко, А.Н. Байдаков, О.С. Цымбаленко, А.В. Гладили. М., Финансы и статистика, 2007, 200 с.
- Шулейкин В.В.** Физика моря. М., АН СССР, 1953, 990 с.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Eds.). N.Y., Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1535 p., DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
- Peixoto J.P., Oort A.H.** Physics of climate // Rev. Modern Phys., 1984, vol. 56, p. 365–429.
- Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B. et al.** Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // J. Geophys. Res., 2003, vol. 108, No. D14, 4407 p., DOI: 10.1029/2002JD002670.
- URL:** <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature> (дата обращения: 13.05.2020).
- URL:** <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/data/download.html> (дата обращения: 13.05.2020).

References

- Zubakin G.K. (Ed.). Ledyanye obrazovaniya morej zapadnoj Arktiki [Ice Formations in the Western Arctic Seas]. St. Petersburg, AARI, 2006, 272 p. (in Russian).
- Lorenz E.N. Priroda i teoriya obshchej tsirkulyacii atmosfery [Nature and the Theory of General Atmospheric Circulations]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970, 260 p. (in Russian).
- Milankovich M. Matematicheskaya klimatologiya i astronomicheskaya teoriya kolebanij klimata [Mathematical Climatology and Astronomical Theory of Climate Fluctuations]. Moscow, Leningrad, GONTI, 1939, 208 p. (in Russian).
- Frolov I.E., Gavrilov V.P. (Eds.). Morskoj led [Sea Ice]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1997, 402 p. (in Russian).
- Palman E., Newton C. Tsirkulyacionnye sistemy atmosfery [Atmospheric Circulation Systems]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1973, 616 p. (in Russian).
- Poghosyan H. Ciklony [Cyclones]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1976, 148 p. (in Russian).
- Fedorov V.M. Trends of the changes in sea ice extent in the Northern Hemisphere and their causes. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 3, p. 46–57.
- Fedorov V.M. Solnechnaya radiatsiya i klimat Zemli [The Earth's Insolation and Recent Climate Changes]. Moscow, Fizmatlit, 2018, 232 p. (in Russian).
- Fedorov V.M. Earth's insolation variation and its incorporation into physical and mathematical climate models. *Physics-Uspokhi*, 2019a, vol. 62, No. 1, p. 32–45, DOI: 10.3367/UFNe.2017.12.038267.
- Fedorov V.M. Commentaries on the article “Impacts of climate change on long-term dynamics of seasonal freezing in Moscow region: retrospective analysis and uncertainties in forecasting for the second half of the 21st century” by S.P. Pozdniakov, S.O. Grinevskiy, E.A. Dedulina. *Earth's Cryosphere*, 2019b, vol. XXIII, No. 4, p. 31–36.
- Fedorov V.M. The problem of meridional heat transport in the astronomical climate theory. *Geofizicheskie Protsestry i Biosfera* [Geophysical Processes and Biosphere], 2019c, vol. 18, No. 3, p. 117–128, DOI: 10.21455/gpb2019.3-8.
- Fedorov V.M., Grebennikov P.B. Insolation contrast of the Earth and changes in the sea ice extent in the Northern hemisphere. *Arktika: Ekologiya i Ekonomika* [The Arctic: Ecology and Economy], 2018, No. 4 (32), p. 86–94, DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-86-94.
- Fedorov V.M., Kostin A.A. The calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC – 2999 AD. *Protsestry v geosredakh* [Processes in Geoenvironments], 2019, No. 2, p. 254–262 (in Russian).
- Fedorov V.M., Frolov D.M. Little Ice Age in the Earth history and its possible reasons. *Zhizn' Zemli* [Life of the Earth], 2020, vol. 42, No. 1, p. 4–12 (in Russian).
- Tsybalenko T.T., Baydakov A.N., Tsybalenko O.S., Gladilin A.V. Metody matematicheskoy statistiki v obrabotke ekonomicheskoy informatsii [Mathematical Statistics Methods in the Economic Data Processing]. Moscow, Finansy i Statistika, 2007, 200 p. (in Russian).
- Shuleikin V.V. Fizika morya [Physics of the Sea]. Moscow, AN SSSR, 1953, 990 p. (in Russian).
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Eds.). New York, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1535 p., DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
- Peixoto J.P., Oort A.H. Physics of climate. *Rev. Modern Phys.*, 1984, vol. 56, p. 365–429.
- Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B. et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, No. D14, 4407 p., DOI: 10.1029/2002JD002670. URL: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature> (last visited: 13.05.2020).
- URL: <http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/data/download.html> (last visited: 13.05.2020).

*Поступила в редакцию 15 мая 2020 г.,
после доработки – 1 сентября 2020 г.,
принята к публикации 5 ноября 2020 г.*