

Сравнение атмосферной циркуляции в районе архипелага Шпицберген во время потепления 1920—1950 гг. и в современный период

П. Н. Священников* **, У. В. Прохорова*,
Б. В. Иванов* **

Приведены результаты исследования временной изменчивости циркуляции атмосферы в Западной Арктике (Норвежское и Баренцево моря). Для характеристики атмосферной циркуляции был использован ежедневный архив форм циркуляции E, W, C по классификации Гирса — Вангенгейма, охватывающий период с 1891 по 2016 г. Особое внимание уделено оценке различий в условиях погоды в современный период потепления 1985—2015 гг. и в период 1920—1950 гг., отмечаемый как период первого потепления в Арктике. Для холодного (ноябрь — март) и теплого (апрель — октябрь) сезонов определены тенденции изменения повторяемости форм циркуляции и вычислена повторяемость числа дней подряд с одинаковой формой циркуляции атмосферы, которую можно рассматривать как характеристику устойчивости условий погоды в рассматриваемые периоды потепления. Исследования показали, что для обоих периодов потепления характерно преобладание повторяемости формы циркуляции E в теплый сезон. Современный период потепления в изучаемом районе, по сравнению с периодом первого потепления, характеризуется увеличением повторяемости формы циркуляции C малой продолжительности. Можно сделать вывод, что современный климатический режим характеризуется повышением приземной температуры воздуха и при этом менее устойчивыми условиями погоды.

Ключевые слова: Арктика, Шпицберген, потепление климата, атмосферная циркуляция, условия погоды.

Введение

Изменения климата особенно ярко проявляются в полярных областях Земли. Интерес к процессам, протекающим в полярных районах, отражается в большом количестве научных публикаций, связанных как с исследованием возможных причин климатических изменений, так и с поиском возможных путей адаптации к наблюдаемым и прогнозируемым изменениям [1, 2, 9, 18, 23].

В данном исследовании рассмотрены изменения во времени характеристик атмосферной циркуляции в районе архипелага Шпицберген, распо-

* Арктический и антарктический научно-исследовательский институт; e-mail: svyashchennikov@mail.ru (Священников Павел Николаевич).

** Санкт-Петербургский государственный университет.

ложенного в области наиболее интенсивного обмена теплом и влагой между Арктикой и умеренными и тропическими широтами. Атмосферная циркуляция вносит существенный вклад в формирование климатической изменчивости [3, 23]. Современное потепление в районе архипелага проявляется наиболее ярко: в последние десятилетия здесь отмечаются повышение приземной температуры воздуха [14, 20] и усиление таяния ледников [19, 21]. Участились случаи, когда устойчивый припай во фьордах архипелага в зимний период года не образуется [12, 22, 24, 27].

Одно из направлений исследований изменения климата в арктических районах — анализ данных инструментальных наблюдений на сети метеорологических станций. Подобный анализ чаще всего связан с исследованием пространственно-временных изменений средних за месяц значений приземной температуры воздуха или месячных сумм атмосферных осадков [13, 20, 26]. Немаловажной причиной такого предпочтения является относительная доступность этих видов наблюдений. Анализ изменения других метеорологических величин, в частности скорости ветра, встречается редко. Можно назвать несколько работ, посвященных исследованию изменений скорости ветра в районе архипелага Шпицберген, основанных на анализе данных наблюдений метеорологических станций, а также данных реанализа [25].

Временные ряды приземной температуры воздуха обнаруживают два периода потепления: первый — в 1920—1950-х годах, второй — с 1975 г. по настоящее время.

Межгодовые изменения приземной температуры воздуха в п. Лонгйир (архипелаг Шпицберген), представленные на рис. 1, могут служить примером проявления обоих периодов потепления в исследуемом районе.

Эти два периода, характеризующиеся повышением приземной температуры воздуха по сравнению с предшествующими годами, могут рассматриваться как климатические режимы со сравнимыми средними значениями, но с разными условиями погоды — стабильными (устойчивыми) или неустойчивыми. В нашем исследовании выполнена сравнительная оценка условий погоды в период потепления 1920—1950-х годов и современного потепления с помощью простой характеристики циркуляции атмосферы, реализованной в классификации форм атмосферной циркуляции Гирса — Вангенгейма. Дополнительной оценкой различий условий погоды в сравниваемые периоды потеплений может служить изменение повторяемости опасных явлений погоды, например, таких как сильный ветер.

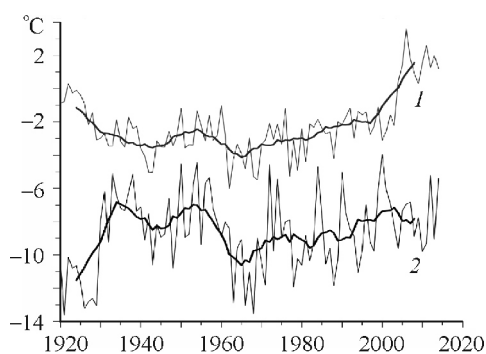


Рис. 1. Временная изменчивость приземной температуры воздуха, средней за теплый (апрель — сентябрь; 1) и холодный (октябрь — март; 2) сезоны, и 11-летние скользящие средние (жирные линии), Лонгйир, Шпицберген.

Данные наблюдений и материалы для анализа

Для анализа циркуляции атмосферы был использован ежесуточный архив форм циркуляции по классификации Гирса — Вангенгейма, созданный в ААНИИ и охватывающий период с 1891 г. по настоящее время. Для приатлантической части Арктики циркуляция атмосферы, согласно классификации, сводится к трем типам: западной (W), восточной (E), меридиональной (C) [6, 8].

Тип циркуляции устанавливается по направлению основных переносов воздушных масс. Западный тип циркуляции характеризуется усилением западного переноса, при котором отмечается зональное смещение циклонов из Атлантического океана на восток. Восточная циркуляция появляется либо при нарушении западного переноса путем вторжения с востока или северо-востока антициклонов, развивающихся в континентальном воздухе, либо при развитии на континенте мощных стационарных антициклонов. Для меридиональной циркуляции характерны нарушение западного переноса при вторжении на север Скандинавии континентального арктического воздуха и образование меридиональной полосы высокого давления через Скандинавию на центральную часть Европы [7, 10].

Ранее выделялись эпохи на основании данных о повторяемости форм циркуляции атмосферы W, E, C в течение года, годовом фоне распределения аномалий давления и температуры воздуха в Северном полушарии [8, 17]. Во многих исследованиях, в том числе упомянутых ранее, посвященных проблемам изменения климата и атмосферной циркуляции и основанных на классификации Гирса — Вангенгейма, были использованы данные о числе дней с той или иной формой циркуляции за каждый месяц и не изучалась внутримесячная изменчивость. В ряде работ было проведено сопоставление изменений приземной температуры воздуха с межгодовой изменчивостью форм атмосферной циркуляции. Была выявлена связь между повышением приземной температуры воздуха и преобладанием форм W и E и понижением температуры воздуха и преобладанием форм C и E [5], а также установлена взаимосвязь между изменениями индекса североатлантического колебания NAO (North Atlantic Oscillation) и формой циркуляции W с количеством атмосферных осадков. Отмечено, что увеличение индекса NAO и повторяемости формы W способствует увеличению количества осадков на юге Западной Сибири [4]. По превышению норм повторяемости одного типа за период с 1973 по 2006 г. были выделены следующие эпохи: 1973—1984 гг. — эпоха циркуляции E; 1985—1990 гг. — переходный период с преобладанием типа E и возрастанием повторяемости типа W; 1991—2006 гг. — W + C [4].

Исследования возможных изменений повторяемости сильных ветров в районе архипелага Шпицберген затруднены из-за отсутствия регулярных метеорологических наблюдений за скоростью ветра, которые охватывали бы оба рассматриваемых периода. Вследствие этого для анализа были привлечены срочные метеорологические наблюдения за скоростью ветра на высоте 10 м, полученные на станциях Вардо (Норвегия), о. Медвежий (Баренцево море), Бухта Тихая (о. Гуккера) и Обсерватория им. Э. Т. Кренкеля (о. Хейса) (две последние — на архипелаге Земля Франца-

Иосифа). Поскольку метеорологические наблюдения на станции Бухта Тихая проводились с 1929 по 1960 г., для анализа были привлечены наблюдения на этой станции за период 1930—1950 гг., а период 1985—2015 гг. оценивался по близко расположенной станции Обсерватория им. Э. Т. Кренкеля. Таким образом, был сформирован единый временной ряд, составленный из данных наблюдений двух вышеуказанных станций. Метеорологические наблюдения непосредственно на архипелаге Шпицберген для планируемого анализа привлечь не удалось. Данные наблюдений на станциях Вардо и на о. Медвежий получены на сайте Норвежского метеорологического института (www.met.no), данные Обсерватории им. Э. Т. Кренкеля — во ВНИИГМИ-МЦД (Обнинск, www.meteo.ru), а для станции Бухта Тихая — в ГНЦ РФ “ААНИИ” (www.meteo.ru). Анализ данных о скорости ветра охватывает значительный период времени, в течение которого на метеорологических станциях произошла смена приборов для ее измерения. Сопоставление скорости ветра, измеренной с помощью анеморумбометра и флюгера, показало завышение значений скорости по данным флюгера [11], для приведения их к скорости, измеренной с помощью анеморумбометра, использован корректирующий коэффициент (0,88).

Результаты и обсуждение

Анализ особенностей атмосферной циркуляции в период первого и современного потепления проводился для условно зимнего сезона (ноябрь — март) и летнего сезона (апрель — октябрь); подобное разделение оправдано существенным различием интенсивности межширотного обмена в холодную и теплую части года [3]. При западной форме циркуляции (W) происходит смещение с запада на восток циклонов в умеренных и высоких широтах, а межширотный обмен ослаблен. В высоких широтах на температурный режим существенно влияет радиационное выхолаживание, способствующее образованию отрицательной аномалии температуры воздуха и приземного давления в исследуемом районе.

Положение высотных гребней и ложбин поля давления при меридиональной форме циркуляции (С) способствует адвекции холода в восточной части высотных гребней, а в западной части — адвекции тепла; в районе архипелага Шпицберген формируется отрицательная аномалия температуры воздуха вследствие адвекции холода. Противоположное форме С распределение высотных гребней при восточной форме циркуляции (Е) приводит к обратному распределению областей адвекции тепла и холода, в исследуемом районе создается положительная аномалия температуры воздуха.

Полученные ранее результаты свидетельствуют, что за период с 1891 г. до настоящего времени в холодную часть года (ноябрь — апрель) наблюдаются тенденция уменьшения числа дней с меридиональным (С) и западным (W) типами циркуляции и значительное увеличение числа дней с восточным (Е) типом. В летний период (март — октябрь) отмечается тенденция увеличения числа дней с типами циркуляции С и Е за счет значительного уменьшения повторяемости дней с типом W [16].

Для каждого сезона и для каждой формы циркуляции была вычислена повторяемость (число дней с определенной формой циркуляции) для каж-

Таблица 1

Средняя повторяемость форм циркуляции в холодный и теплый сезоны в период первого и современного потепления

Форма	1920—1950 гг.		1985—2015 гг.	
	Холодный сезон	Теплый сезон	Холодный сезон	Теплый сезон
С	50(±15)	44(±17)	38(±12)	48(±14)
W	67(±17)	59(±19)	65(±13)	63(±21)
Е	65(±18)	80(±25)	80(±14)	71(±18)

Примечание. В скобках приведены доверительные интервалы, вычисленные с помощью критерия Стьюдента.

дого года, соответственно для периода 1920—1950 гг. и периода 1985—2015 гг., характеризующего современное потепление. Результаты представлены в табл. 1. Временные изменения в течение рассматриваемых периодов повторяемостей каждой формы циркуляции, а также линейные тренды показаны на рис. 2. Как следует из данных табл. 1, в теплую часть года в период 1920—1950 гг. наибольшей повторяемостью обладает тип

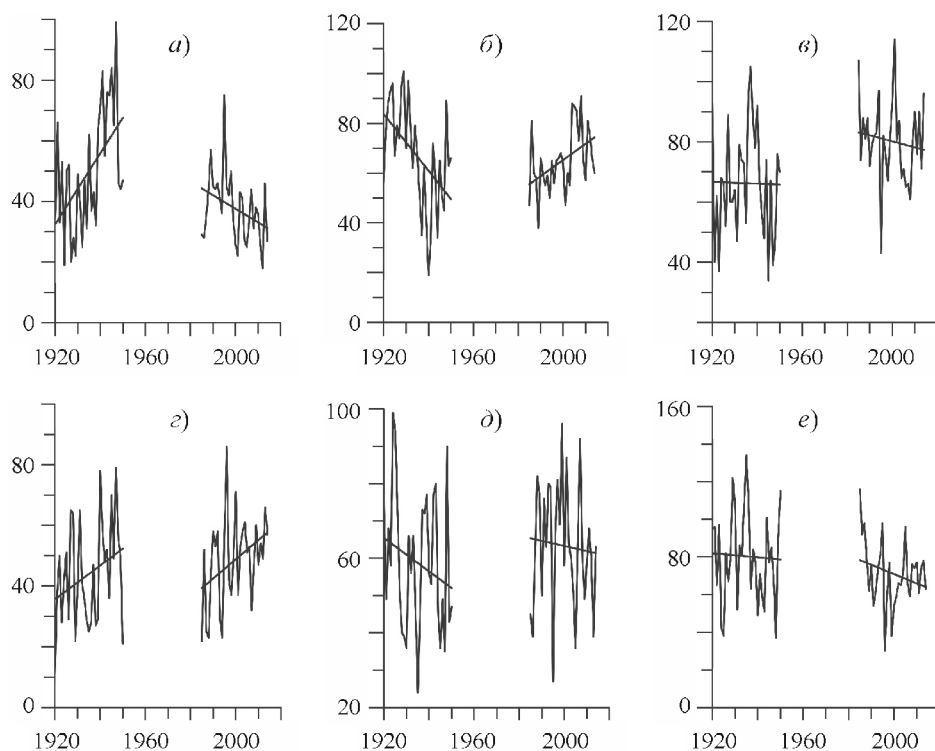


Рис. 2. Временная изменчивость повторяемости (сут) типов циркуляции за периоды первого (1920—1950 гг.) и современного (1985—2015 гг.) потеплений в холодный (октябрь — март; а, б, в) и теплый (апрель — сентябрь; г, д, е) сезоны.

а, г — тип С; б, д — тип W; в, е — тип E.

циркуляции E (80 дней за сезон), повторяемость W — 59 дней, типа C — 44 дня. Средние величины повторяемостей незначительно различаются для периодов потепления, кроме того, тенденции в течение периода потепления для каждой формы циркуляции имеют одинаковый знак. Оба периода потепления в теплый сезон характеризуются увеличением в течение 30 лет повторяемости формы C (рис. 2*з*) и уменьшением повторяемостей форм W и E (рис. 2*д, е*).

В холодную часть года существуют различия в повторяемости типов циркуляции в период первого и современного потеплений. В период первого потепления наиболее вероятным типом циркуляции был тип W (67 дней), тогда как в период современного потепления наиболее вероятен тип E (80 дней за сезон). В результате в период первого потепления при преобладании типа W происходят усиление западного переноса и ослабление меридионального обмена, в то время как в период современного потепления отмечается усиление меридионального воздухообмена. Временные тенденции изменения повторяемости типов циркуляции C и W имеют разные направленности. Повторяемость типа C в течение первого периода потепления увеличивается, а в период современного потепления — уменьшается (рис. 2*а*), для типа W отмечается обратное соотношение (рис. 2*б*).

Оценить, насколько устойчивы или неустойчивы были условия погоды, можно, вычислив продолжительность существования того или иного типа циркуляции в течение определенного числа дней подряд. Подобная оценка может служить косвенной характеристикой продолжительности естественного синоптического периода, предложенного Б. П. Мультиановским [15]. На рис. 3 представлена повторяемость существования каждой формы циркуляции на протяжении ряда дней. Для анализа были выбраны три града-

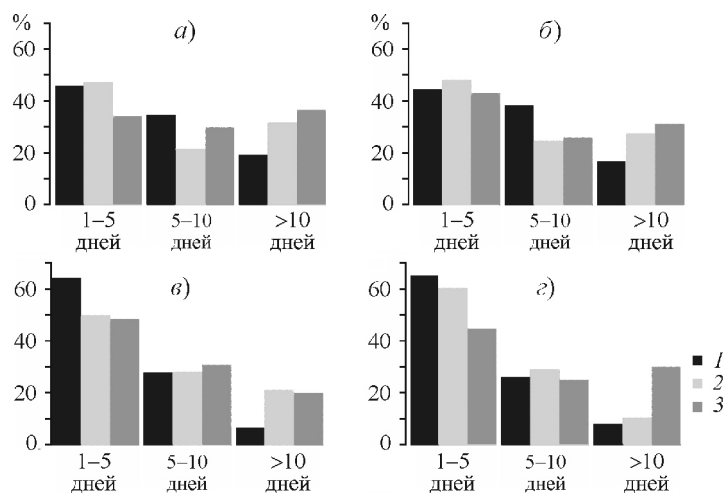


Рис. 3. Частота (%) установления типов циркуляции за период с 1920 по 1950 г. (а, б) и с 1985 по 2015 г. (в, з), за холодный (а, в) и теплый (б, з) сезоны по градациям: короткие (1—5 дней), средние (5—10 дней) и продолжительные (более 10 дней).

1 — тип C; 2 — тип W; 3 — тип E.

Таблица 2

Повторяемость (%) случаев с сильным ветром на разных метеорологических станциях в холодный и теплый сезоны для периодов потеплений 1920—1950 и 1985—2015 гг.

Метеостанция	1920—1950 гг.		1985—2015 гг.	
	Холодный сезон (ноябрь — март)	Теплый сезон (апрель — октябрь)	Холодный сезон (ноябрь — март)	Теплый сезон (апрель — октябрь)
Бухта Тихая (с 1930 г.)	10,5(±3,7)	3,4(±1,8)	—	—
Обсерватория им. Э. Т. Кренкеля	—	—	9,0(±3,1)	3,8(±2,3)
Вардо	15,7(±6,9)	3,3(±1,9)	4,8(±2,3)	0,9(±0,8)
о. Медвежий	10,2(±5,3)	7,4(±3,1)	7,3(±3,7)	1,8(±1,7)
<i>Примечание.</i> В скобках приведены доверительные интервалы, вычисленные с помощью критерия Уилсона.				

ции продолжительности: 1—5 дней — короткие, 5—10 дней — средние, более 10 дней — продолжительные. Как видно на представленном рисунке, в период современного потепления увеличилась повторяемость коротких временных отрезков существования типов циркуляции с продолжительностью 1—5 дней. Соответственно, произошло уменьшение числа длительных периодов существования каждого из трех типов циркуляции. Такие изменения особенно отразились на повторяемости формы С. Следовательно, климат в период современного потепления характеризуется часто сменяющимися друг друга синоптическими ситуациями и, соответственно, менее устойчивым режимом погоды по сравнению с периодом первого потепления.

Каждому из типов циркуляции соответствуют преобладающие траектории перемещения циклонов и пространственное поле аномалий приземного давления и температуры воздуха. Полученные выше результаты, свидетельствующие об изменении характера условий погоды, предполагают возможное изменение повторяемости опасных явлений погоды в рассматриваемом районе. Для выяснения этого вопроса по данным срочных наблюдений на ряде метеорологических станций были оценены вероятности возникновения такого опасного явления, как сильный ветер. Для района архипелага Шпицберген наиболее опасным следует считать увеличение скорости ветра до 15 м/с и более. Для каждого из периодов потеплений были вычислены повторяемости условий погоды со скоростью ветра на высоте 10 м над поверхностью, превышающей 15 м/с. Вычисления сделаны для холодного и теплого сезонов, результаты представлены в табл. 2.

Как следует из данных таблицы, повторяемость сильного ветра в холодную часть года в несколько раз больше, чем в теплую. По наблюдениям на метеорологических станциях, расположенных в южной и центральной частях исследуемого района, период современного потепления характеризуется уменьшением повторяемости случаев с сильным ветром по сравнению с первым периодом потепления. В северной части (наблюдения на архипелаге Земля Франца-Иосифа) различия между периодами незначительны.

Заключение

Проведенный анализ показал существование различий режимов циркуляции в периоды первого и современного потеплений. Повторяемости существования каждого типа циркуляции незначительно различаются в теплый сезон в период первого потепления и в период современного потепления. Наибольшая повторяемость отмечается у типа циркуляции E. В холодный сезон в период первого потепления наибольшую повторяемость имел тип W, тогда как в период современного потепления наибольшую повторяемость имеет тип E.

Климатический режим в теплый и холодный сезоны современного потепления реализуется как режим в большей степени с непродолжительными и, следовательно, часто сменяющимися друг друга периодами определенного типа циркуляции. Частая смена типов циркуляции не способствует образованию крупных аномалий в поле приземной температуры воздуха и давления воздуха и, соответственно, созданию условий для возникновения сильного ветра.

Исследования выполнены в рамках плановой тематики Целевой научно-технической программы Росгидромета “Исследование многолетних изменений гидрометеорологического режима и состояния природной среды арх. Шпицберген” (раздел 1.5.3.7), совместной научной программы Росгидромета и Норвежского метеорологического института на 2019—2021 гг. (раздел 3), а также при поддержке гранта Национального научного центра Польши “Causes of the early 20th century Arctic warming” (№ 2015/19/B/ST10/02933) и проекта “Исследование быстрых климатических изменений в Арктике и их региональных и крупномасштабных последствий” (шифр заявки 2017-14-588-0005-003, уникальный идентификатор проекта RFMEFI615617X0078).

Литература

1. Алексеев Г. В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике. — *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2015, т. 1, с. 11—26.
2. Алексеев Г. В., Кузьмина С. И., Уразгильдеева А. В., Бобылев Л. П. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на потепление в Арктике в зимний период. — *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2016, т. 1, с. 43—63.
3. Алексеев Г. В., Священников П. Н. Естественная изменчивость характеристик климата Северной полярной области и северного полушария. — Л., Гидрометеониздат, 1991, 159 с.
4. Безуглова Н. Н., Зинченко Г. С. Региональные климатические проявления глобальной циркуляции атмосферы на юге Западной Сибири. — *География и природные ресурсы*, 2009, № 3, с. 83—87.
5. Боков В. Н., Воробьев В. Н. Изменчивость атмосферной циркуляции и изменение климата. — *Ученые записки РГГМУ*, 2010, № 13, с. 83—88.
6. Вангенгейм Г. Я. Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики. — *Труды ААНИИ*, 1952, т. 34, с. 1—52.
7. Гирс А. А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. — Л., Гидрометеониздат, 1974, 488 с.
8. Гирс А. А. Многолетние преобразования атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. — Л., Гидрометеониздат, 1971, 280 с.
9. Груза Г. Н., Ранькова Э. Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России. — Обнинск, ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2012, 194 с.

- 10. Демин В. И., Священников П. Н., Иванов Б. В.** Изменения крупномасштабной циркуляции атмосферы и современное потепление климата на Кольском полуострове. — Вестник Кольского научного центра РАН, 2014, т. 84, № 2, с. 101—105.
- 11. Дроздов О. А., Васильев В. А., Кобышева Н. В., Раевский А. Н., Смекалова Л. К., Школьный Е. П.** Климатология. — Л., Гидрометеоздат, 1989, 568 с.
- 12. Иванов Б. В., Павлов А. К., Андреев О. М., Журавский Д. М., Священников П. Н.** Исследования снежно-ледяного покрова залива Грен-фьорд (арх. Шпицберген): исторические данные, натурные исследования, моделирование. — Проблемы Арктики и Антарктики, 2012, № 2 (92), с. 43—54.
- 13. Кононова Н. К.** Особенности циркуляции атмосферы Северного полушария в конце XX — начале XXI века и их отражение в климате. — Сложные системы, 2014, № 2, с. 11—35.
- 14. Куражов В. К., Иванов В. В., Коржиков А. Я.** Роль атмосферной циркуляции в формировании долгопериодных колебаний климата Арктики. — Труды ААНИИ, 2007, т. 447, с. 33—44.
- 15. Мультиановский Б. П.** Основные положения синоптического метода долгосрочных прогнозов погоды. — М., ЦУУГМС, 1933, ч. 1, 142 с.
- 16. Прохорова У. В., Священников П. Н., Иванов Б. В.** Исследование временной изменчивости характеристик атмосферной циркуляции в районе арх. Шпицберген. — Проблемы Арктики и Антарктики, 2017, № 4, с. 47—56.
- 17. Сидоренков Н. С., Орлов И. А.** Атмосферные циркуляционные эпохи и изменения климата. — Метеорология и гидрология, 2008, № 9, с. 22—29.
- 18. ACIA.** Impacts of Warming Arctic. Arctic Climate Impact Assessment. — Cambridge Univ. Press, 2004, 140 p.
- 19. Day J. J., Bamber J. L., Valdes P. J., and Kohler J.** The impact of a seasonally ice free Arctic Ocean on the temperature, precipitation and surface mass balance of Svalbard. — Cryosphere, 2012, No. 6, pp. 35—50; <https://doi.org/10.5194/tc-6-35-2012>.
- 20. Gjelten H. M., Nordli O., Isaksen K., Forland E. J., Sviashchennikov P. N., Wyszynski P., Prokhorova U. V., Przybylak R., Ivanov B. V., and Urazgildeeva A. V.** Air temperature variations and gradients along the coast and fjords of western Spitsbergen. — Polar Res., 2016, vol. 35, No. 1, p. 29878.
- 21. Hagen J. O., Kohler J., Melvold K., and Winther J. G.** Glaciers in Svalbard: Mass balance, runoff and freshwater flux. — Polar Res., 2003, vol. 22, No. 2, pp. 145—159.
- 22. Nilsen F., Cottier F., Skogseth R., and Mattsson S.** Fjord–shelf exchanges controlled by ice and brine production: The interannual variation of Atlantic Water in Isfjorden, Svalbard. — Contin. Shelf Res., 2008, vol. 28, No. 14, pp. 1838—1853.
- 23. Overland J. E. and Wang M.** Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. — Tellus A, 2010, vol. 62, No. 1, pp. 1—9.
- 24. Pavlov A. K., Tverberg V., Ivanov B. V., Nilsen F., Falk-Petersen S., and Granskog M. A.** Warming of Atlantic water in two west Spitsbergen fjords over the last century (1912—2009). — Polar Res., 2013, vol. 32, 1206; <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v32i0.11206>.
- 25. Pilguy N., Kolendowicz L., Kryza M., Migala K., and Czernecki B.** Temporal changes in wind conditions at Svalbard for the years 1986—2015. — Geogr. ann., A, 2019; <http://doi.org/10.1080/04353676.2019.1572973>.
- 26. Przybylak R., Arazny A., and Kejna M.** Topoclimatic Diversity in Forlandsundet Region (NW Spitsbergen) in Global Warming Conditions. — Oficyna Wydawnicza Turpress, 2012, 174 p.
- 27. Zhuravskiy D., Ivanov B., and Pavlov A.** Ice conditions at Gronfjorden Bay, Svalbard, from 1974 to 2008. — Polar Geogr., 2012, vol. 35, No. 2, pp. 169—176; doi: 10.1080/1088937X.2012.662535.