

ОПАСНЫЕ ПОГОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АРКТИКЕ

^{1,2}И.А. Репина, ¹А.А. Шестакова, ^{2,1}М.И. Варенцов,

¹Ф.А. Погарский, ¹Д.Г. Чечин

repina@ifaran.ru

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Россия, г. Москва,

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Россия, г. Москва

Аннотация. Береговая зона арктических морей севера Евразии становится объектом первоочередного внимания в связи с необходимостью создания производственной инфраструктуры по добыче, хранению и транспортировке полезных ископаемых, прежде всего, углеводородов. Но сокращение ледяного покрова Арктических морей предоставляет не только новые возможности, в частности, для повышения эффективности судоходства по Северному морскому пути, но и порождает новые проблемы. Экстремальные штормовые явления и сильные циклоны могут оказывать значительное влияние на инфраструктуру, сельское хозяйство, экосистемы и судоходство. Шторма, полярные мезоциклоны и морские льды создают опасность для судоходства, рыболовства, для объектов на шельфе морей.

Введение

Арктика и северные районы Евразии являются одним из наиболее чувствительных регионов к глобальным климатическим изменениям [1,2], где скорость роста температуры примерно в 2 раза выше, чем на всей планете в целом [2]. Рост температуры сопровождается изменениями других атмосферных переменных [3], в частности сокращением льда в Арктике [4,5], изменением гидрометеорологического режимов и изменениями облачного покрова [6,7].

В настоящее время Арктика привлекает повышенное внимание не только как регион с наиболее заметными климатическими изменениями, но и как мировая кладовая полезных ископаемых, перспективы разработки которых активно обсуждаются. Для России, владеющей основной частью арктического шельфа, Арктика является и перспективной торговой и транспортной артерией, так как в последние десятилетия открываются новые возможности использования Северного Морского пути.

Но климатические изменения могут привести и к не столь благоприятному исходу. Среди наиболее катастрофических последствий для прибрежных арктических районов: усиление эрозии крутых берегов, деградация уникальных прибрежных и морских экосистем, повреждение жилых зданий и технических сооружений, изменение топографии дна в результате эрозии. Климатические изменения в северной полярной области могут вызвать изменения в глобальной атмосферной циркуляции и меридиональном переносе тепла, что приведет к усилению циклонической активности в регионе. Увеличение площади морской поверхности свободной ото льда усиливает роль ветровых волн в Арктическом бассейне. Рост

наблюдаемых в регионе высот волн, обусловленный увеличением пространственных масштабов их генерации (разгона волн), несет в себе угрозу платформам по добыче углеводородов на континентальном шельфе, судам, идущим по Северному морскому пути или его участкам, а также береговым сооружениям, в том числе за счет увеличения скорости эрозии берега. Уменьшение продолжительности ледового сезона активизирует динамику льда, увеличивая его торосистость, и, в результате усиливается воздействие дрейфующих в ледяных полях торосистых образований на дно. Увеличение продолжительности динамически активного периода приводит к усилению воздействия волн на берег, что, несомненно, сказывается на динамике берегов, вызвав усиление их абразии. Воздействие этих катастрофических явлений может усугубляться возрастающей уязвимостью человеческого общества; например, Европа и Россия ставятся более уязвимыми с учетом растущей урбанизации, интенсивной разработки естественных ископаемых на Арктическом шельфе и в северных морях, и с увеличением морских транспортировок по северным морским путям.

Ветровой режим Арктики

Катабатические ветра являются одним из основных климатообразующих факторов Арктических архипелагов (таких как Шпицберген, Новая Земля, Северная Земля) [8,9] и играют важную роль и в организации хозяйственной и исследовательской деятельности в этих регионах. Понимание движущих механизмов, формирующих ветровой климат Арктики, имеет ключевое значение для различных исследовательских и прикладных задач: регионального прогноза погоды, планирования промышленной деятельности и улучшения качества жизни местного населения. В частности, сильные и устойчивые приземные ветра в западной части Шпицбергена существенно влияют на океанские процессы и ледообразование [10] не только в окрестностях архипелага, но во всем атлантическом секторе Арктики [11]. Эти ветра являются движущей силой для океанской циркуляции и перемешивания, играющих значимую роль в биологических процессах в прибрежных районах [12,13]. Но сеть метеорологических станций, которые предоставляют информацию по климатологии ветра, довольно редка в Арктике. Исследования приземного ветра прибрежных районов Арктики основаны на качественных, но короткопериодных измерениях и поэтому недостаточны чтобы охарактеризовать ветровой климат региона, его вертикальную структуру и механизмы образования [8, 14-16]. Поэтому необходимо использование моделей высокого разрешения. Использование спутниковой информации для диагностики стоковых ветров, ареалов их распространения, взаимодействия с морской поверхностью представляет значительный интерес, но в настоящее время анализируется лишь на качественном уровне [17-19].

Частным случаем катабатических ветров являются подветренные бури. Подветренными бурями называются сильные ветра, которые формируются на подветренных склонах гор при строго определенном сочетании скорости и стратификации натекающего потока. Классическими примерами

подветренных бурь являются бора и фён. Лучше всего эти ветра изучены в густонаселенных районах мира и России – на Черноморском побережье Кавказа, на Адриатическом побережье, в Скалистых горах и Альпах. В полярных широтах большое внимание уделялось фёнам в Антарктиде [20]. В Арктике известны подветренные бури на Новой Земле, в Певеке (Чукотка) [21, 22], а также на некоторых склонах архипелага Шпицберген [23], однако степень их изученности значительно ниже. При этом их влияние на климат может быть значительно выше, чем у подветренных бурь, возникающих в умеренных и тропических широтах. Например, известно, что частые фёны на Шпицбергене приводят к ускоренному таянию ледников в теплое время года [24], а при новоземельской боре потоки тепла из океана в атмосферу возрастают в несколько раз по сравнению с обычными условиями [25], что должно приводить к охлаждению приповерхностного слоя воды и даунвеллингу.

Изменчивость скорости ветра в Арктике исследуется в большом количестве работ как по данным наблюдений наземных станций на островах и побережьях Арктики [26-28]. Второй оценочный доклад..., Wan et al. 2010, Hundedcha 2008), данных спутниковых альтиметров [29], так и по данным реанализов [30-34]. Для будущего климата рассматривается изменение средних и экстремальных значений скорости ветра по данным моделей CMIP5 [35, 36].

Оценки текущего изменения скорости ветра и высоты волнения в Арктике очень сильно разнятся при рассмотрении разных периодов, сезонов, регионов и источников данных. Согласно Второму оценочному докладу Росгидромета, на фоне общего уменьшения скорости ветра на территории России, слабые положительные тренды на станциях отмечаются лишь на Новой Земле, Северной Земле и севере Таймыра, а весной и на северо-западе Чукотки. Однако число дней со скоростью ветра более 15 м/с на берегу Северного Ледовитого океана сильно уменьшилось (на 10-20% за декаду). Для акваторий российских арктических морей также проводился анализ трендов метеорологических параметров по данным GLDAS за 1979-2011 гг [31], который выявил отрицательный тренд в море Лаптевых, Белом море и особенно сильный в Восточно-Сибирском море, в то время как в Чукотском и особенно Баренцевом море тренд скорости ветра положительный. На побережье канадской Арктики тренды скорости ветра по данным наблюдений на станциях положительные, в отличие от континентальной части Канады, где скорость значительно уменьшается в последние 60 лет [27]. Такая картина распределения трендов близка к той, что получена для территории России [26].

Полярные мезоциклоны

Полярными мезоциклонами называют интенсивные мезомасштабные вихри, которые образуются в высоких широтах, как правило, в холодный период года. Образование ПМЦ часто происходит в условиях вторжения холодной воздушной массы со льда на открытую относительно теплую морскую поверхность [37]. Их размеры относительно невелики и составляют от сотни до тысячи километров (характерный масштаб 200–600 км.), а время

жизни изменяется от нескольких часов до нескольких суток. Интерес к их исследованию объясняется тем, что МЦ имеют взрывной характер формирования и вызывают экстремальные погодные явления (штормовые волнение и ветер, обледенение судов и сооружений, снежные заряды с ухудшением видимости). Очаги формирования полярных мезоциклонов существуют в высоких широтах как северного, так и южного полушарий [38]. В Северном полушарии основные районы их распространения: моря Бофорта, Норвежское [39], Баренцево [40], Гренландское, Лабрадор [41] Охотское и Берингово моря [42], залив Аляска [43], также они наблюдаются в Японском море, расположенном значительно южнее основных районов мезоциклогенеза в Атлантическом и Тихом океанах [44]. В последние годы, в связи с уменьшением площади ледяного покрова и увеличением продолжительности безледного сезона в морях Восточной Арктики, полярные мезоциклоны стали образовываться и там, где ранее практически не наблюдались: над Карским, Восточно-Сибирским морями и морем Лаптевых [45].



Рис. 1. Формирование полярного мезоциклона на фоне холодного вторжения.
Данные MODIS, 7 марта 2013 года.

В связи с небольшим размером и малым временем жизни полярных мезоциклонов, их обнаружение и анализ на основе синоптической информации крайне затруднены, а в большинстве случаев просто невозможны из-за низкой плотности сети метеорологических наблюдений в полярных широтах. По этой причине для изучения полярных мезомасштабных вихрей часто используются данные дистанционного зондирования Земли из космоса – в первую очередь, спутниковые снимки видимого диапазона, на которых полярные мезоциклоны обычно видны как спирали и запятыя в облачных полях, хотя встречаются и более сложные облачные структуры мезовихрей [46] (Рис.1). Наиболее полную информацию дает мультиспектральный подход к анализу данных спутникового зондирования, позволяющий использовать данные приборов, работающих в различных диапазонах электромагнитного спектра [42, 45, 47]. Использование спутников, оснащенных активными и пассивными микроволновыми приборами, обладающих более высоким

разрешением и широкой полосой обзора, значительно расширило возможности, связанные с получением информации о полярных мезовихрях.

Тем не менее, спутниковые данные имеют неравномерное в пространстве и времени покрытие территории, а также неоднородность временных серий наблюдений различных спутников и приборов, вследствие чего они плохо подходят для применения формализованных алгоритмов идентификации и анализа полярных циклонов, в частности, в задачах изучения их климатологии и трендов ее изменения. Гораздо лучше для подобных задач подходят регулярные сеточные данные – различные реанализы, или же результаты регионального климатического моделирования [48]. Но современные глобальные реанализы имеют пространственное разрешение недостаточное для корректного воспроизведения полярных циклонов [49].

В настоящее время предполагается, что существует четыре основных механизма, которые могут определять развитие полярных мезоциклонов (ПМЦ). Это конвективная неустойчивость [43], в том числе вызванная интенсивным обменом теплом поверхности с атмосферой под действием ветра (WISHE), бароклинная неустойчивость, термическая неустойчивость, вызванная выделением скрытого тепла конденсации в средней тропосфере (CISK), динамическая неустойчивость, вызванная аномалией потенциального вихря на уровне тропопаузы.

При оценке роли этих механизмов, большинство исследований в настоящее время опираются на данные спутникового зондирования с высоким разрешением или данные численного моделирования гидродинамическими мезомасштабными моделями. Количественная оценка вклада каждого из факторов для реальных циклонов затруднена, что мотивирует гидродинамическое моделирование идеализированных случаев, когда подобные оценки можно произвести явно.

Воспроизведение полярных мезоциклонов в рамках современных гидродинамических моделей атмосферы технически не является проблемой. Современный уровень вычислительных технологий и проведение численных экспериментов с региональными моделями атмосферы с горизонтальным шагом сетки порядка первых километров [50, 51], позволяющим разрешать мезомасштабные процессы в атмосфере и, в частности, полярные мезоциклоны. При этом даже увеличение шага сетки с 75 км (в реанализе ERA-Interim) до 30 км (в Arctic System Reanalysis) значительно повышает качество воспроизведения полярных мезоциклонов [52].

Однако формальная возможность воспроизведения подобных объектов при повышении шага сетки является необходимым, но недостаточным явлением для их успешного прогноза. Немногочисленные работы, посвященные оценке качества воспроизведения подобных явлений в рамках региональных мезомасштабных моделей атмосферы, показали высокую чувствительность результатом моделирования к настройкам модели, используемым параметризациям и конфигурации численных экспериментов.

Морское волнение

По спутниковым данным с конца 1970-х годов отмечается значительное сокращение площади арктических морских льдов (<http://nsidc.org/>). От тенденций изменений для морских льдов зависят перспективы использования основных арктических транспортных систем, в частности Северного морского пути, эффективность рыболовства и шельфовых разработок [53-55]. При уменьшении покрытия Арктического бассейна морскими льдами следует ожидать усиления интенсивности морского волнения в связи с увеличением длины разгона волн. Уровень волнообразования зависит от ветровой активности в атмосфере, длины волны, сплоченности льда, размера ледовых полей. Рост наблюдаемых в регионе высот волн, обусловленный увеличением пространственных масштабов их генерации (разгона волн), несет в себе угрозу платформам по добыче углеводородов на континентальном шельфе, судам, идущим по Северному морскому пути или его участкам, а также береговым сооружениям, в том числе за счет увеличения скорости эрозии берега. Особую важность представляет и взаимодействие ветровых волн с морским льдом. При штормовых ветрах возможно развитие сильного волнения, способного разрушить лед и сместить границы кромки льда на тысячи километров, образовав тем самым положительную обратную связь, еще больше увеличив доступный для волн масштаб разгона. (см. Рис. 2 с примером ледовых условий летом 2012 г.). В частности, в районе Чукотского моря и моря Бофорта по описанному сценарию в августе 2012 г. площадь ледового покрова сократилась на 10^6 км² за 4 суток в результате воздействия ветровых волн, образовавшихся при прохождении через район двух циклонов [56].

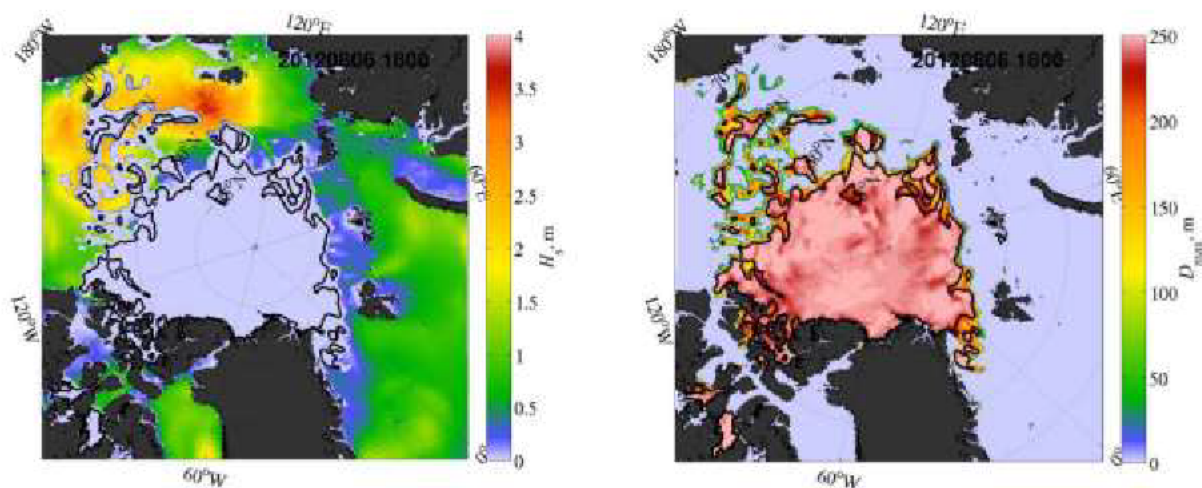


Рис. 2. Результат летнего шторма 2012 г. из прогностической системы TORAZ. Прогноз волнения был выполнен из модели Global WAVEWATCH III. Левый рисунок показывает предсказанную значимую высоту волн (волн выше 4 м. не наблюдается), сплошная линия показывает границу сплошного льда. Правый рисунок показывает прогноз максимальных размеров ледяных полей, образовавшихся в результате разрушения льда волнами. Сплошная линия та же, что и на левом рисунке и обозначает границу льдин больших 250 м. Наибольшее количество разрушенных льдин наблюдается в тихоокеанском секторе.

Моделирование взаимодействия морского волнения и льда имеет давнюю историю [57]. В настоящее время наибольшие ошибки в

моделировании морского волнения наблюдаются в прикромочных зонах. После ветра в Арктике морской лед и айсберги играют наиболее важную роль в формировании морского волнения. Попытки включить лед в модели морского волнения были и раньше, например, для описания диссипации зыби [58]. Данные дистанционного зондирования также используются для валидации модели в прикромочных зонах. В используемой в настоящее время версии глобальной модели прогноза волнения WAVEWATCH, границы морского льда задаются из прогностической модели (ECMWF), которая основана на грубом разрешении (25 км) данных по морскому льду со спутников SSM/I.

В работе [26], где рассматривается климатология и тренды высоты волны и скорости ветра по данным альтиметров в летние месяцы в период 1996-2015 гг., в целом отмечается положительный тренд средних и экстремальных значений высоты волн для большей части морей Арктики, а также для экстремальных значений (90 и 99 перцентиль) скорости ветра.

Заключение

Проведенный в статье анализ показывает большую вероятность возрастания частоты повторяемости опасных гидрометеорологических явлений в Арктике при современных изменениях климата. В особенности, при уменьшении площади ледяного покрова. Согласно модельным оценкам, при антропогенных сценариях отступление морского льда в Арктике будет продолжаться и дальше, что может существенно продлить сезон морской навигации и приблизить перспективу использования новых высокоширотных маршрутов для судоходства. В последние годы, признавая важность и необходимость развития Северного морского пути, Правительство РФ приняло ряд государственных программ, предусматривающих дальнейшее развитие и освоение арктического региона и его континентального шельфа, базовое инвестирование в объекты транспортной и логистической инфраструктуры в акватории российского участка СМП, строительство новых атомных ледоколов, использование новых технологий и экологической защиты для использования в районах Арктики и Крайнего Севера. При этом климатические изменения несут в себе как негативное, так и позитивное влияние - важен учет и оценка рисков.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-05-80065-опасные явления.

Список литературы

1. ACIA. 2005. Arctic climate impact assessment. Cambridge: Cambridge University Press.
2. IPCC. 2014. Summary for policymakers. In Climate change 2014: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, ed. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley. Cambridge and New York: Cambridge University Press.
3. Serreze M.C., Barry, R.G. 2011. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // Global and Planetary Change. 2011. V. 77(1-2). P. 85-96.

4. Stroeve J., Holland M.M., Meier W., Scambos T., Serreze M. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // *Geophysical research letters*. 2007. V. 34(9).
5. Liu Y., Key J.R., Wang X. Influence of changes in sea ice concentration and cloud cover on recent Arctic surface temperature trends // *Geophysical Research Letters*. 2009. V. 36(20).
6. Wang X., Key J.R. Arctic surface, cloud, and radiation properties based on the AVHRR Polar Pathfinder dataset. Part I: Spatial and temporal characteristics // *Journal of Climate*. 2005. V. 18(14). P.2558-2574.
7. Eastman R., Warren S.G. Interannual variations of Arctic cloud types in relation to sea ice // *Journal of Climate*. 2010. V. 23(15). P.4216-4232.
8. Esau I., Repina I. Wind climate in Kongsfjorden, Svalbard, and attribution of leading wind driving mechanisms through turbulence-resolving simulations // *Adv. Meteorol.* 2012. P. 568454, 16 p.
9. Gorter W., Van Angelen J.H., Lenaerts J.T., Van den Broeke M.R. Present and future near-surface wind climate of Greenland from high resolution regional climate modelling // *Climate dynamics*. 2014. V. 42(5-6). P. 1595-1611.
10. Geyer F., Ferand I., Smedsrud L.H. Structure and forcing of the overflow at the Storfjorden sill and its connection to the Arctic coastal polynya in Storfjorden // *Ocean Science*. 2010. V. 6, No. 1. P. 401–411.
11. Sandvik A.D., Furevik B.R. Case study of a coastal jet at Spitsbergen - comparison of SAR- and model-estimated wind // *Monthly Weather Review*. 2002. V. 130, No. 4. P. 1040–1051.
12. Sundfjord A., Albretsen J., Kasajima Y., Skogseth R., Kohler J., Nuth C., Skarðhamar J., Cottier F., Nilsen F., Asplin L., Gerland S. Effects of glacier runoff and wind on surface layer dynamics and Atlantic Water exchange in Kongsfjorden, Svalbard; a model study // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2017. V. 187. P. 260-272.
13. Noufal K.K., Najeem S., Latha G., Venkatesan R. Seasonal and long term evolution of oceanographic conditions based on year-around observation in Kongsfjorden // *Arctic Ocean, Polar Science*. 2017. V. 11. P.1-10.
14. Argentini S., Viola A.P., Mastrantonio G., Maurizi A., Georgiadis T., Nardino M. Characteristics of the boundary layer at Ny-Alesund in the Arctic during the ARTIST field experiment // *Annali di Geofisica*. 2003. V. 46, No. 2. P. 185–196.
15. Biene H.J., Argentini S., Maurizi A., Mastrantonio G., Viola A. The local wind field a Ny-Alesund and Zeppelin mountain at Svalbard // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2001. V. 78. P. 107-113.
16. Репина И.А., Иванов Б.В., Кузнецов Р.Д. Режим ветра над ледниковыми склонами (по данным измерений на архипелаге Шпицберген) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2009. Т. 6(2). С. 180-187.
17. Bromwich D.H., Carrasco J.F. Satellite observations of katabatic wind propagation for Great distances across the Ross ice shelf // *Month. Weather Rev.*, 1992. V. 120. P. 1940-1949.
18. Li X., Zheng W., Pichel W.G., Zou C.Z., Clemente-Colón P. Coastal katabatic winds imaged by SAR // *Geophysical research letters*. 2007. V. 34(3). L03804.
19. Olthmanns M., Straneo F., Moore G.W., Mernild S.H. Strong downslope wind events in Ammassalik, southeast Greenland // *Journal of Climate*. 2014. V. 27(3). P. 977-993.
20. Steinhoff D. F., Bromwich D. H., Monaghan A. Dynamics of the foehn mechanism in the McMurdo Dry Valleys of Antarctica from Polar WRF // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2013. V. 139, №. 675. P. 1615-1631.
21. Шестакова А.А. Волновое сопротивление при подветренных бурях в разных регионах России по результатам моделирования // *Метеорология и гидрология*. 2018. No.3. С. 98–104.
22. Шестакова А. А. Новоземельская бора: подветренные характеристики и структура натекающего потока // *Арктика и Антарктика*. 2016, . No.2. С. 11–22.

23. Maciejowski W., Michniewski A. Variations in weather on the east and west coasts of South Spitsbergen, Svalbard // *Polish Polar Research*. 2007. V. 28, issue 2. P. 123-136.
24. Majchrowska E., Ignatiuk D., Jania J., Marszałek H., Wąsik M. Seasonal and interannual variability in runoff from the Werenskioldbreen catchment, Spitsbergen // *Polish Polar Research*. 2015. V. 36(3). P. 197-224.
25. Moore G. W. K. The Novaya Zemlya Bora and its impact on Barents Sea air-sea interaction // *Geophysical Research Letters*. 2013. V. 40(13). P. 3462-3467.
26. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Алексеев, Г. В., Ананичева, М. Д., Анисимов, О. А., Ашик, И. М., Бардин, М. Ю., Богданова, Э. Г. и др. Государственный научный центр Российской Федерации "Арктический и антарктический научно-исследовательский институт" Федеральной служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. 2014.
27. Wan H., Wang X.L., Swail V.R. Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds // *Journal of Climate*. 2010. V. 23(5). P. 1209-1225.
28. Hundecha Y., St-Hilaire A., Ouarda T.B.M.J., El Adlouni S., Gachon P. A nonstationary extreme value analysis for the assessment of changes in extreme annual wind speed over the Gulf of St. Lawrence, Canada // *Journal of applied meteorology and climatology*. 2008. V. 47(11). P. 2745-2759.
29. Liu Q., Babanin A.V., Zieger S., Young I. R., Guan C. Wind and wave climate in the Arctic Ocean as observed by altimeters // *Journal of Climate*. 2016. V. 29(22). P. 7957-7975.
30. Суркова Г.В., Соколова Л.А., Чичев А.Р. Многолетний режим экстремальных значений скорости ветра в Баренцевом и Карском морях // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2016. Т.5. С. 53-58.
31. Костяной, А. Г., Гинзбург, А. И., Лебедев, С. А. Климатическая изменчивость гидрометеорологических параметров морей России в 1979-2011 годах // *Труды Главной геофизической обсерватории им. АИ Воейкова*. 2014. Т. 570. С. 50-87.
32. Hughes M., Cassano J.J. The climatological distribution of extreme Arctic winds and implications for ocean and sea ice processes // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. V. 120(15). P. 7358-7377.
33. Stopa J.E., Cheung K.F., Tolman H.L., Chawla A. Patterns and cycles in the climate forecast system reanalysis wind and wave data // *Ocean Modelling*. 2013. V. 70. P. 207-220.
34. Wang X.L., Feng Y., Swail V.R., Cox A. Historical changes in the beaufort–chukchi–bering seas surface winds and waves, 1971–2013 // *Journal of Climate*. 2015. V. 28(19). P. 7457-7469.
35. Суркова Г.В., Крылов А.А. Изменения средних и экстремальных скоростей ветра в Арктике в конце XXI века // *Арктика и Антарктика*. 2018. Т. 3. С. 23-36.
36. Dobrynin M., Murawsky J., Yang S. Evolution of the global wind wave climate in CMIP5 experiments // *Geophysical Research Letters*. 2012. V. 39(18).
37. Rasmussen E.A., Turner J. Polar lows. Cambridge: Cambridge University press, 2003.
38. Turner J., Lachlan-Cope T., Thomas J. A comparison of Arctic and Antarctic mesoscale vortices // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 13019-13034.
39. Wilhelmsen K. Climatological study of gale-producing polar lows near Norway // *Tellus*. 1985. V. 37A. P. 451–459.
40. Rasmussen E. A case study of a polar low development over the Barents Sea // *Tellus*. 1995. V. 37A. P. 407–418.
41. Mailhot J., Hanley D., Bilodeau B., Hertzman O. A numerical case study of a polar low in the Labrador Sea // *Tellus*. 1996. V. 48A. P. 383–402.
42. Гурвич И.А., Митник Л.М., Митник М.Л. Мезомасштабный циклогенез над дальневосточными морями: исследование на основе спутниковых микроволновых радиометрических и радиолокационных измерений // *Исследование Земли из космоса*. 2008. №. 5. С. 58-73.

43. Businger S. The synoptic climatology of polar-low out-breaks over the Gulf of Alaska and the Bering Sea // *Tellus*. 1987. V.39A. P.307–325.
44. Yanase W., Niino H., Watanabe S.I.I., Hodges K., Zahn M., Spengler T., Gurvich I.A., Climatolgy of polar lows over the Sea of Japan using the JRA-55 reanalysis // *Journal of Climate*. 2016. V. 29. P. 419-436.
45. Заболотских Е.В., Гурвич И.А., Шапрон Б. Новые районы распространения полярных циклонов в Арктике как результат сокращения площади ледяного покрова // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 2. С. 64–77.
46. Мохов И.И., Акперов М.Г., Лагун В.Е., Луценко Э.И. Интенсивные арктические мезоциклоны // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т.43, № 3. С. 291-297.
47. Заболотских Е.В., Митник Л.М., Бобылев Л.П. Сравнительная оценка существующих и перспективных методов исследования в области мониторинга и прогнозирования мезо-масштабных циклонических вихрей, включая полярные циклоны // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7. №. 3. С. 23-29.
48. Zahn M., von Storch H. A longterm climatology of North Atlantic polar lows // *Geophys. Res.Lett.* 2008. V. 35. №. 22.
49. Варенцов М.И., Вережемская П.С., Заболотских Е.В., Репина И.А. Оценка качества воспроизведения полярных мезоциклонов по данным реанализов и результатам регионального климатического моделирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 4. С. 168–191.
50. Clark P., Roberts N., Lean H., Ballard S.P., Charlton-Perez C. Convection-permitting models: A step-change in rainfall forecasting // *Meteorol. Appl.* 2016. V. 23. № 2. P. 165–181.
51. Prein A.F., Langhans W., Fosser G., Ferrone A., Ban N., Goergen K., Keller M., Tölle M., Gutjahr O., Feser F., Brisson E., Kollet S., Schmidli J., Lipzig N.P.M. Van, Leung R. A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges // *Rev. Geophys.* 2015. V. 53. № 2. P. 323–361.
52. Smirnova J., Golubkin P. Comparing polar lows in atmospheric reanalyses: Arctic System Reanalysis versus ERA-Interim // *Monthly Weather Review*. 2017. V. 145. №. 6. P. 2375-2383.
53. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А. Изменения распространения морских льдов в Арктике и связанные с ними климатические эффекты: диагностика и моделирование // *Лед и снег*. 2013. № 2 (122). С. 53-62.
54. Хон В.Ч., Мохов И.И. Климатические изменения в Арктике и возможные условия арктической морской навигации в XXI веке // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2010. Т.46. № 1. С. 19-25.
55. Khon V.C., Mokhov I.I., Latif M., Semenov V.A., Park W. Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the 21st century // *Climatic Change*. 2010. P. 757-768.
56. Parkinson C. L., Comiso J. C. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm // *Geophys.Res.Lett.* 2013. 40(7). P.1356-1361.
57. Ardhuin F., Marié L., Rascle N., Forget P., Roland A. Observation and estimation of Lagrangian, Stokes, and Eulerian currents induced by wind and waves at the sea surface // *Journal of Physical Oceanography*. 2009. V. 39(11). P. 2820-2838.
58. Squire V.A. Of ocean waves and sea-ice revisited // *Cold Regions Science and Technology*. 2007. V. 49(2). P.110-133.