

СГОННО-НАГОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ БЕЛОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ 2004–2020 ГГ.

А.Т. Кондрин¹, А.Д. Кораблина²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии*

¹ *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: alt.kondrin@yandex.ru*
² *Независимый исследователь, канд. геогр. наук; e-mail: jacksparrow91@bk.ru*

На основании данных наблюдений, охватывающих период с 2004 по 2020 г., рассмотрены колебания остаточного уровня Белого моря в синоптическом диапазоне временных масштабов, причем основное внимание уделено нагонам и сгонам. Используются данные ежедневных наблюдений уровня в ряде пунктов побережья: Сосновец, Северодвинск, Соловки, Кандалакша. Сгоны и нагоны исследованы на основании анализа колебаний остаточного уровня моря (ОУМ), определяющегося путем удаления из данных наблюдений приливной составляющей. Наибольшей дисперсией характеризуются колебания ОУМ в Двинском заливе. В пунктах Сосновец, Соловки колебания ОУМ обладают примерно одинаковой дисперсией, которая существенно ниже, чем в Двинском заливе. Самая низкая дисперсия наблюдается в Кандалакше. Согласно данным, полученным на станциях Северодвинск и Соловки, за рассматриваемый промежуток времени наблюдается заметный рост дисперсии колебаний ОУМ, что указывает на возрастание их интенсивности. Если сравнивать пятилетние периоды, то в Северодвинске средняя дисперсия в 2004–2008 гг. равна 327,3 см², в 2009–2013 гг. – 341,4 см², а в 2016–2020 гг. – 386,8 см². Этот вывод подтверждается и расчетами обеспеченности положительных отклонений ОУМ, а также тем, что количество нагонов высотой не менее 100 см за 12 лет (2004–2015) было всего два, а в пятилетний промежуток (2016–2020) имели место уже пять таких случаев. Описаны семь типов синоптических ситуаций, при которых в Белом море возникали нагоны, причем два из них ранее не рассматривались. На долю западных циклонов различных траекторий приходится 73 (74,5%) из 98 случаев нагонов, рассмотренных в настоящей работе. Наибольшие по величине нагоны в Северодвинске за рассматриваемый период достигали высоты 130 см (22 августа 2018 г.) и 153 см (15 ноября 2011 г.). Значительные сгоны происходят реже, чем нагоны и по своей абсолютной величине, как правило, уступают последним. Сгон 31 января 2005 г. был сильнейшим за весь период 2004–2020 гг. В Северодвинске ОУМ понизился на 123 см ниже среднемесячной отметки, в Соловках – на 112 см.

Ключевые слова: приливы, остаточный уровень моря, штормовые нагоны, дисперсия, обеспеченность, синоптические ситуации, межгодовая изменчивость

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.8

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассматриваются колебания уровня Белого моря в синоптическом диапазоне, включающем временные масштабы от нескольких суток до нескольких недель [Монин, 1982]. В синоптическом диапазоне наблюдаются значительные колебания остаточного уровня моря (ОУМ), среди которых важнейшую роль играют сгоны и нагоны, возникающие в результате воздействия метеорологических факторов, в основном таких, как изменения приземного атмосферного давления (ПДА) и ветровое воздействие. Белое море относится к приливным морям и в нем вклад приливов в общую дисперсию колебаний уровня доминирует и составляет в Горле 93%, в Кандалакше – 96%, в Двинском заливе – 67%, на Соловецких о-вах – 65%. Однако во многих случаях размах колебаний ОУМ при на-

гонах сопоставим с величиной прилива. Значительные штормовые нагоны в сочетании с приливом нередко приводят к повышению уровня выше критических значений, при которых происходит затопление прибрежных территорий.

Результаты исследований колебаний уровня Белого моря, относящиеся к периоду времени до 1980-х гг., обобщены в монографиях [Filatov et al., 2005; Гидрометеорология..., 1991], а также в работе [Инжебейкин, 2003]. В частности, в этих работах показано, что в Белом море штормовые нагоны нередко носят индуцированный характер. Проходящие над акваториями Баренцева и Белого морей западные циклоны генерируют в акватории Баренцева моря барическую волну, которая затем проникает в Белое море и индуцирует нагон. Результаты ранних исследований представляют собой важный этап в изу-

чении сгонно-нагонных колебаний уровня в Белом море, однако, нуждаются в уточнении и существенном дополнении с привлечением новых данных.

В последние годы синоптические колебания уровня Белого моря по-прежнему привлекали большое внимание исследователей и рассматривались в ряде работ на основании анализа данных наблюдений, а также с привлечением численного моделирования. Штормовые нагоны в устье Северной Двины, приводящие к опасным наводнениям, рассмотрены в [Лебедева и др., 2015; Магрицкий, Скрипник, 2016].

В работах [Korablina et al., 2017; Кондрин, 2016] на основании данных наблюдений и численного моделирования рассмотрены колебания остаточного уровня моря (ОУМ) в синоптическом диапазоне периодов, что позволило более углубленно изучить характеристики и особенности формирования штормовых нагонов в различных синоптических ситуациях. Приводится количественное распределение случаев нагонов по высоте по отдельным месяцам и годам для различных пунктов побережья Белого моря. Оценен вклад ветра, атмосферного давления и ветрового волнения в формирование нагона.

В данной работе рассмотрены сгонно-нагонные колебания уровня Белого моря на основании анализа данных наблюдений в 2004–2020 гг. в ряде пунктов. Следует подчеркнуть, что временные ряды колебаний уровня Белого моря такой продолжительности анализируются впервые. Выделены 98 случаев нагонов, во время которых максимальный подъем ОУМ в Северодвинске относительно среднемесячных значений был не менее 50 см. Такое пороговое значение высоты нагона выбрано потому, что в таких случаях может быть превышена критическая отметка уровня. Нагоны, как и сгоны, рассматриваются в совокупности с формирующими их синоптическими ситуациями. Рассмотрены сценарии развития нагонов при различных синоптических ситуациях. На основании анализа ежечасных рядов уровня продолжительностью 17 лет рассмотрена межгодовая изменчивость колебаний ОУМ в синоптическом масштабе с целью выявления трендов изменения их интенсивности за рассматриваемый промежуток времени.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы данные ежечасных наблюдений уровня моря на станциях Сосновец, Северодвинск и Соловки за 2004–2020 гг., а также в Кандалакше в 2017–2019 гг. (рис. 1). Приливные колебания получены путем гармонического анализа данных наблюдений над уровнем с помощью метода наименьших квадратов [Pawlowicz et al., 2002; Foreman, 1977]. Используемая методика гармонического анализа приливов учитывает 45 астрономи-

ческих и 101 мелководную гармонику приливных колебаний. При этом гармонические постоянные рассчитаны на 95%-ном доверительном уровне. Для получения ОУМ приливная составляющая вычитается из данных наблюдений. Полученные таким образом временные ряды содержат незначительные колебания на приливных частотах. Для полного исключения колебаний на этих частотах был применен фильтр Баттерворта с частотой среза 0,04 ц/ч, соответствующей периоду 25 ч [Emery, Thompson, 2001]. Повышения и понижения ОУМ во время нагонов и сгонов приведены относительно среднемесячных значений. Синоптические ситуации анализировались с помощью карт ПДА, построенных на основании реанализа CFSR и опубликованных на сайте [http://www.wetterzentrale.de]. Статистические расчеты выполнены с помощью пакета MATLAB-программ Statistical Tool Box.

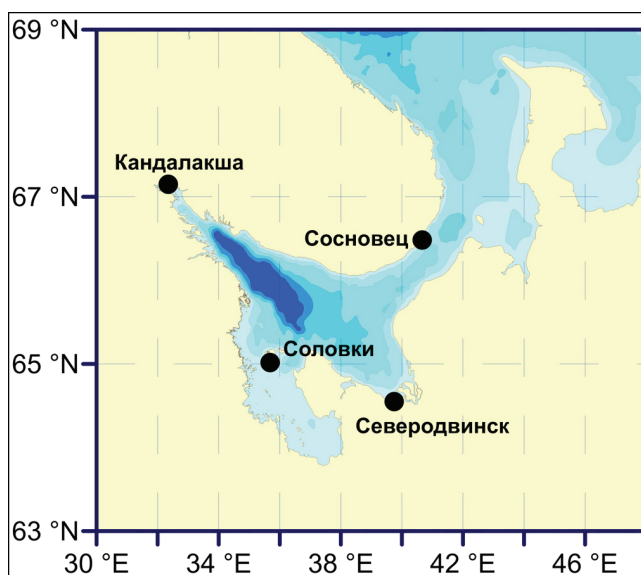


Рис. 1. Расположение пунктов измерений уровня моря

Fig. 1. Location of sea level measurement points

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонные и межгодовые изменения. В таблице 1 представлено распределение количества рассматриваемых в данной работе 98 нагонов по месяцам за 17-летний период. Согласно полученным данным, за исследуемый период времени в Белом море наибольшее количество нагонов наблюдалось осенью и зимой (по 36%), весной – 18%, летом – 10%. Наибольшее количество нагонов зафиксировано в ноябре (17) и в январе (14), наименьшее – в июне и июле – по три нагона. Аналогичное соотношение распределения нагонов по сезонам и месяцам имело место по данным численного моделирования в 1979–2015 гг. [Kondrin, Korablina, 2017].

Распределение количества нагонов по месяцам и сезонам в 2004–2020 гг.

Зима			Весна			Лето			Осень			Сумма
Дек	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	
12	14	9	7	6	5	3	3	4	8	10	17	98
35			18			10			35			

Описанная сезонная изменчивость связана с перестройкой атмосферной циркуляции с летней на зимнюю вследствие обострения Исландского минимума зимой и увеличения его площади [Кислов, 2006; Морозова и др., 2022]. Этот процесс сопровождается интенсификацией циклонической деятельности на арктическом атмосферном фронте, который в холодное время года смещается к югу и располагается в полосе широт $73\text{--}77^\circ$ с. ш. на западе Баренцева моря и $67\text{--}75^\circ$ с. ш. в его восточной части [Титкова и др., 2014].

На рис. 2А показана дисперсия колебаний ОУМ, характеризующая интенсивность синоптических колебаний уровня в пунктах Северодвинск, Соловки, Сосновец и Кандалакша. Показанная на рис. 2А дисперсия рассчитана путем осреднения дисперсий колебаний ОУМ, полученных за каждый месяц. Наибольшей дисперсией характеризуются колебания ОУМ в Двинском заливе. В Соловках и Сосновце колебания ОУМ обладают примерно одинаковой дисперсией, которая существенно ниже, чем в Двинском заливе. Самая низкая дисперсия наблюдается в Кандалакше.

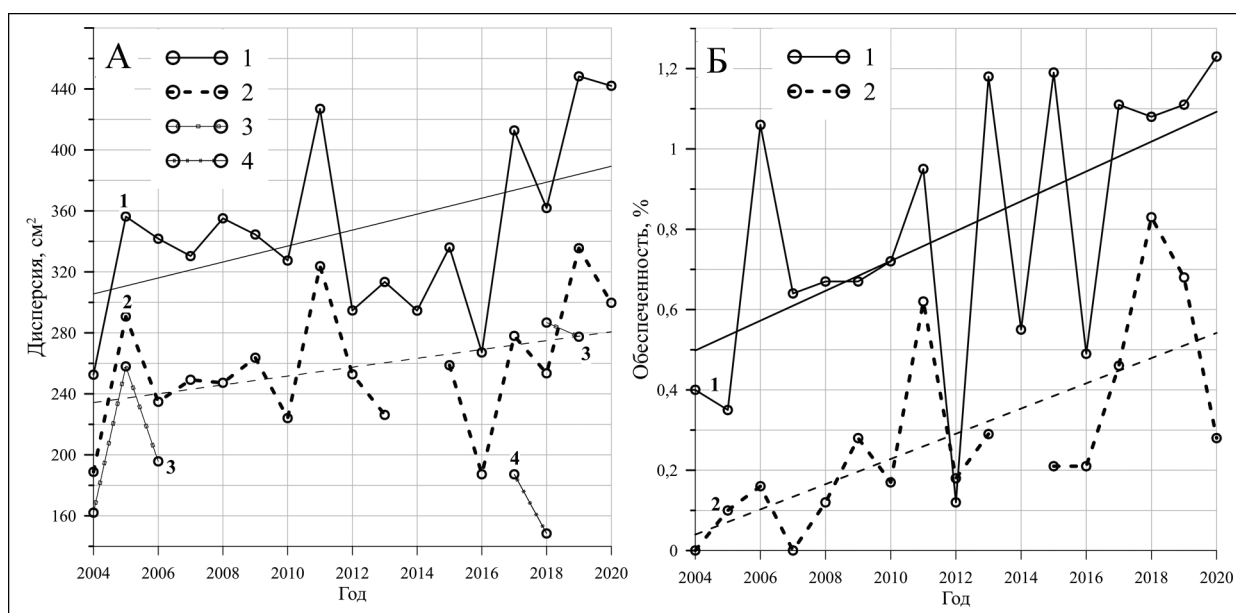


Рис. 2. Статистические характеристики синоптических колебаний уровня:

А – дисперсия синоптических колебаний ОУМ с 2004 по 2020 г.: 1 – Северодвинск; 2 – Соловки, 3 – Сосновец; 4 – Кандалакша; Б – обеспеченность положительного отклонения ОУМ не менее 60 см от среднемесячного уровня в Северодвинске (1) и Соловках (2). Прямые на графиках показывают линейную регрессию межгодовых изменений рассматриваемых величин

Fig. 2. Statistical parameters of synoptic level fluctuations:

А – variance of RSL synoptic fluctuations from 2004 to 2020 in Severodvinsk (1), Solovki (2), Sosnovets (3) and Kandalaksha (4); Б – probability of a positive RSL deviation at least 60 cm from the mean monthly level in Severodvinsk (1) and Solovki (2). Straight lines on the graphs show a linear regression of interannual changes in the values under consideration

Согласно данным, полученным на станциях Северодвинск и Соловки, наименьшие значения дисперсии наблюдались в 2004 и 2016 гг. Относительный минимум дисперсии по сравнению с соседними годами отмечен в 2018 г. Максимумы дисперсии наблюдались в 2005, 2011, 2017 и 2019 гг. Дисперсия в 2006–2010 гг. существенно не менялась, однако

после максимума 2011 г. произошел спад. В 2012–2014 гг. дисперсия была даже ниже, чем в 2005–2010 гг. В 2016 г. дисперсия опустилась примерно до уровня 2004 г. Начиная с 2017 г. наблюдается ее заметный рост, что свидетельствует об увеличении интенсивности колебаний ОУМ. Дисперсия в 2017–2020 гг., особенно на станции Северодвинск, суще-

ственно выше, чем в 2004–2010 гг. Возрастание дисперсии по сравнению с 2004–2010 гг. отмечается и на других станциях. Если сравнивать пятилетние периоды, то в Северодвинске средняя дисперсия в 2004–2008 гг. была равна 327,3, в 2009–2013 гг. – 341,4, а в 2016–2020 гг. – 386,8. В Соловках аналогичные величины следующие: 242,1, 258,1, 270,8. Эти результаты

указывают на то, что энергия колебаний ОУМ возрастает. К этому следует добавить, что количество нагонов, во время которых ОУМ повышался на 90 см и более, в 2004–2015 гг. равнялось шести, а за пять лет 2016–2020 г. – семи. Если рассматривать нагоны высотой не менее 100 см, то в 2004–2015 гг. их было два, а в 2016–2020 гг. – пять (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики нагонов

№ п/п	Дата	ПДА / ТЦ	$R_M/H_M/H_0/T_{RM}$			ТН
			Сосновец (725)*	Северодвинск (612)*	Соловки (605)*	
1	20.12.2007	975 / 1	63 / 180 / 660 / 01	92 / 128 / 635 / 11	60 / 91 / 594 / 14	ИВ
2	02.02.2009	985 / 1	91 / 231 / 685 / 15	111 / 155 / 617 / 20	87 / 109 / 588 / 23	И
3	06.11.2010	970 / 1	62 / 272 / 748 / 12	96 / 161 / 655 / 08	70 / 112 / 612 / 14	БЛ
4	15.11.2011	970 / 1	–	153 / 188 / 701 / 13	112 / 140 / 653 / 16	ИВ
5	28.12.2011	970 / 1	–	97 / 164 / 649 / 09	64 / 110 / 612 / 22	ИВ
6	18.11.2013	970 / 4	60 / 218 / 709 / 02	94 / 152 / 655 / 02	47 / 97 / 605 / 08	БЛ
7	12.12.2013	960 / 1	90 / 205 / 691 / 13	86 / 120 / 625 / 19	90 / 111 / 620 / 21	И
8	16.03.2016	970 / 1	80 / 215 / 679 / 02	105 / 166 / 648 / 10	85 / 112 / 598 / 12	И
9	21.01.2017	970 / 1	77 / 191 / 651 / 11	107 / 142 / 623 / 15	81 / 106 / 607 / 17	И
10	22.08.2018	985 / 6	99 / 182 / 644 / 13	130 / 163 / 638 / 10	85 / 109 / 604 / 18	БЛ
11	21.11.2018	980 / 2	71 / 206 / 685 / 16	105 / 144 / 630 / 00	81 / 113 / 613 / 02	И
12	17.02.2019	985 / 4	67 / 212 / 687 / 19	94 / 153 / 626 / 22	82 / 117 / 613 / 24	ИВ
13	04.08.2019	980 / 7	46 / 263 / 729 / 06	98 / 169 / 645 / 12	67 / 119 / 614 / 18	ИВ
14	22.01.2020	970 / 1	69 / 222 / 722 / 09	100 / 151 / 644 / 18	68 / 101 / 614 / 16	ИВ

Примечание. R_M – максимальная высота ОУМ при нагоне относительно среднемесячного уровня M ; T_{RM} – время наступления R_M при нагоне; H_M – максимальная измеренная (суммарная) высота уровня относительно M ; H_0 – максимальная измеренная (суммарная) высота уровня относительно нуля поста; ПДА – приземное атмосферное давление в центре циклона; ТЦ – тип циклона; ТН – тип нагона: И – индуцированный нагон; ИВ – индуцированный нагон, существенно трансформированный воздействием ветра; БЛ – нагон, сформировавшийся в акватории Белого моря.

* В скобках – критический уровень при нагонах.

Пусть Z_M – отклонение ОУМ от среднемесячного значения, положительное либо отрицательное. Тогда обеспеченность данного значения Z_M есть отношение количества случаев, для которых $|Z| \geq |Z_M|$, к общему числу анализируемых наблюдений, выраженное в процентах (%). Расчет выполнен для ежечасных рядов ОУМ продолжительностью один год. Результаты расчета обеспеченности превышения ОУМ не менее 60 см представлены на рис. 2Б. В целом обеспеченность положительных отклонений ОУМ тем больше, чем больше дисперсия. В течение рассматриваемого промежутка времени наблюдается тенденция к ее росту. Например, в 2011 г. на станции Северодвинск обеспеченность положительных отклонений ОУМ не менее 60 см была намного больше (0,95%), чем в 2004 г. (0,40%). Максимальная обеспеченность таких отклонений была в

2020 г. (1,23%). Такие же закономерности присущи колебаниям ОУМ на станциях Соловки и Сосновец. Так как использовались ежечасные ряды наблюдений, можно рассчитать, в течение какого времени тот или иной уровень был превышен в течение года. Например, в Северодвинске в 2019 г. обеспеченность превышения ОУМ не менее 60 см составляла 1,1%. Длина анализируемого годового ряда равна 8712 значений. Таким образом, ОУМ был выше 60 см в течение 96 часов суммарно в течение этого года. В 2004 г. эта величина была равна 35 часам при обеспеченности 0,4% и длине ряда 8736 значений. В 2018 г. обеспеченность высоты ОУМ не менее 60 см при длине ряда 8760 значений в Северодвинске составила 1,08% (95 часов), в Соловках – 0,85% (98,1 часа), в Сосновце – 0,29% (25 часов), в Кандалакше – 0,15% (13 часов).

Типизация синоптических ситуаций, при которых возникали нагоны в Белом море. Штормовые нагоны формируются в прибрежных районах при прохождении циклонов в результате падения ПДА и ветрового воздействия. Анализ полей ПДА позволил выделить семь типов синоптических ситуаций, при которых происходили нагоны в 2004–2020 гг. [Kondrin, Korablina, 2023].

Первый тип. Циклон Баренцева моря. Траектория проходит через Баренцево море с запада или северо-запада в юго-восточную, реже восточную его часть. К этому типу относятся как циклоны, проходящие через западную границу Баренцева моря, так и «ныряющие». Перед и во время нагонов центры циклонов этого типа располагаются в юго-восточной части Баренцева моря или над прилегающей к ней северной частью европейской территории России (ЕТР), или восточнее, над южной частью Карского моря и в районе п-ва Ямал.

Ко **второму типу** относятся арктические циклоны, траектория которых проходит вдоль 80° с. ш. – Гренландское море – арх. Шпицберген – северная граница Баренцева моря – арх. Земля Франца-Иосифа и далее на восток. Во время нагона эти циклоны в ряде случаев образуют малоподвижную обширную депрессию в приполярной области к северу от Баренцева или Карского морей, либо в их северной части.

В ситуации **третьего типа** траектория циклонов проходит через Скандинавский и Кольский п-ва с выходом в юго-восточную часть Баренцева моря и далее на восток. Центры циклонов при нагоне располагаются в юго-восточной части Баренцева моря вблизи Белого моря, в Печорском море и над Обской губой.

В ситуации **четвертого типа** траектория циклонов проходит из Северного моря через Скандинавский п-ов, Ботнический залив, Финляндию, далее на восток над акваторией Белого моря к Приполярному Уралу.

Пятый тип подобен типу 4, однако в этом случае траектории циклонов проходят южнее Белого моря.

К **шестому типу** относятся циклоны, возникающие в пределах ЕТР и в момент нагона находящиеся к востоку от Белого моря либо к северо-востоку (Карское море).

Седьмой тип. Белое море находится между областью высокого давления (1020–1030 гПа) на западе (Гренландия, Норвежское море, Скандинавский п-ов) и циклоном (990–1000 гПа) на востоке (ЕТР, Северный Урал, Западная Сибирь).

Согласно ранним исследованиям [Гидрометеорология..., 1991], циклоны, перемещающиеся в районе Белого и Баренцева морей, разделяются на «ныряющие», западные по Баренцеву, западные по Белому морям, южные и аномально смещающиеся.

Описанная здесь классификация атмосферных процессов при нагонах в основном согласуется с этой схемой (ситуации 1, 3–6), однако содержит две новые синоптические ситуации 2 и 7, которые ранее не рассматривались.

Согласно полученным результатам за рассматриваемый период времени (2004–2020) в Белом море имели место 98 случаев нагонов с максимальной высотой ОУМ относительно среднемесячного значения в Северодвинске 50 см и выше. При этом в ситуации 1 произошли 44 нагона, в ситуации 2 – шесть, в ситуации 3 – пять, в ситуации 4 – 15 нагонов и в ситуации 5 – три нагона. Таким образом, на долю западных циклонов (ситуации 1, 2, 3, 4 и 5) приходится 73 случая нагонов, т. е. 74,5%. Двадцать один нагон имел место при ситуации 6, остальные четыре – при ситуации 7.

Характеристики нагонов. При описании нагонов приняты следующие условные обозначения: M – среднемесячная высота уровня моря относительно нуля поста, R_M – максимальная высота ОУМ при нагоне относительно среднемесячного уровня M ; T_{RM} – время наступления максимума R_M при нагоне; H_M – максимальная измеренная (суммарная) высота уровня относительно M ; H_0 – максимальная измеренная высота уровня относительно нуля поста, ПДА – приземное атмосферное давление (ПДА) в центре циклона. Отношение $k = R_M/H_M$, выраженное в процентах, характеризует относительный вклад повышения ОУМ в суммарное повышение уровня относительно среднемесячного значения. Кроме того, при описании нагонов учитывается, что в Белом море возраст прилива, т. е. запаздывание фазы прилива от соответствующего астрономического события (сизигия, квадратура), составляет примерно трое суток.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют случаи суммарного повышения уровня H_0 выше критической отметки. Таких случаев в Северодвинске (критический уровень 612 см) в рассматриваемый период времени насчитывается 36, в Сосновце (критический уровень 725 см) – пять, в Соловках (критический уровень 605 см) – 16. Хотя достижение критического уровня зависит не только от высоты R_{Mp} но также от среднемесячного уровня M и фазы прилива, все же в большинстве таких случаев (31 из 36) в Северодвинске k принимал значения от 50 до 81,4%. В Соловках в 15 случаях превышения критического уровня из 16 k изменялся от 52 до 87,9% и лишь в одном случае был равен 48,4%. В Сосновце картина совсем другая. Здесь в пяти случаях превышения критического уровня k находился в пределах от 12,2 до 22,8%. Это объясняется тем, что в Горле вклад приливов в общую дисперсию колебаний уровня намного больше, чем

в других рассматриваемых пунктах, за исключением Кандалакши. Тем не менее в ряде случаев вклад повышения ОУМ здесь был достаточно велик. Например, 12.12.2013 $k = 42,9\%$ (см. табл. 2, № 7); 21.01.2017 – 40,3% (см. табл. 2, № 9); 22.08.2018 – 51,1% (см. табл. 2, № 10).

Отметим, что величины R_M и H_M рассчитаны относительно среднемесячных уровней, поэтому сезонные изменения уровня из этих данных исключены.

В табл. 2 помещены нагоны, при которых $R_M \geq 90$ см и которые можно считать экстремальными. За 2004–2020 гг. таких нагонов произошло 14. В одиннадцати случаях нагоны относятся к типичным индуцированным (И-нагоны) и индуцированным с существенной ветровой составляющей (ИВ-нагоны), для которых характерно наступление максимума ОУМ сначала в Сосновце, затем в Северодвинске и позднее в Соловках. Промежутки времени между этими событиями могут быть различными в зависимости от степени ветрового воздействия в акватории Белого моря. Для типичного сценария И-нагона (см. табл. 2, № 2, 7, 8, 9, 11) временной промежуток между максимумом в Сосновце и Северодвинске составляет от 4 до 8 часов, в среднем около 6 часов, в Соловках максимум ОУМ достигается на 2–3 часа позже, чем

в Северодвинске. В случае сильного ветрового воздействия (ИВ-нагоны) промежутки времени между моментами наступления максимума ОУМ в рассматриваемых пунктах могут существенно изменяться (см. табл. 2, нагоны 1, 4, 5, 12, 13), а при нагоне 22 января 2020 г. в результате ветрового воздействия максимальное повышение ОУМ было достигнуто в Соловках на 2 часа раньше, чем в Северодвинске (см. табл. 2, № 14). Для типичного индуцированного нагона разница величин R_M в Соловках и Северодвинске менее значительна, чем в случае ИВ-нагонов. В Соловках R_M при И-нагонах составляет от 75,7 до 105% от этой величины в Северодвинске, в среднем 82,7%. В случае ИВ-нагонов указанное отношение обычно меньше и лежит в пределах 63,4–87,2%, в среднем – 70,2%.

Остальные три нагона (№ 3, 6, 10) были сформированы непосредственно в акватории Белого моря в результате преобладающего локального воздействия атмосферных факторов (БЛ-нагоны).

Наибольшие по высоте нагоны имели место 15 ноября 2011 г. [Магрицкий, Скрипник, 2016] и 22 августа 2018 г. [Kondrin, Korablina, 2023]. В Северодвинске в первом случае $R_M = 153$ см (рис. 3Б), во втором $R_M = 130$ см. Ниже приводятся описания некоторых типичных нагонов с различными сценариями развития.

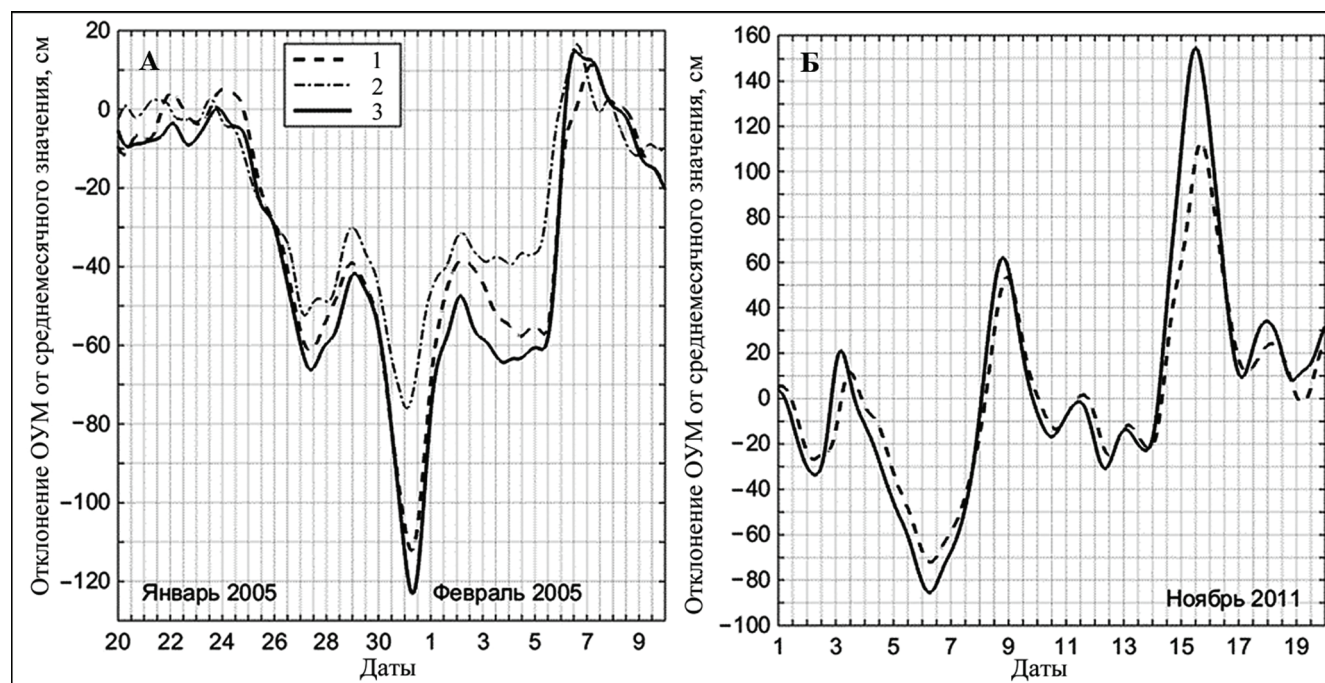


Рис. 3. Колебания ОУМ в январе–феврале 2005 г. (А) и в ноябре 2011 г. (Б):

1 – Соловки; 2 – Сосновец; 3 – Северодвинск

Fig. 3. The RSL fluctuations in January-February 2005 (A) and in November 2011 (B):

1 – Solovki; 2 – Sosnovets; 3 – Severodvinsk

Нагон 18 ноября 2013 г. (см. табл. 2, № 6) возник в результате действия очень быстрого (до 80 км/ч) глубокого (975 гПа) циклона четвертого типа, центр которого перед нагоном располагался над Двинским заливом, затем переместился к юго-востоку и создал сильный нагонный ветер северо-западных румбов [Кондрин, 2016]. В Северодвинске при значениях $R_M = 94$ см и $H_M = 152$ см $k = 62\%$. Суммарное возвышение уровня относительно нуля поста достигло очень большой величины ($H_0 = 655$ см) при довольно высоком среднемесячном уровне $M = 503$ см. В Соловках подъем ОУМ был существенно меньше ($R_M = 47$ см), но суммарный подъем уровня относительно нуля поста все же достиг критической отметки $H_0 = 605$ см при высоком среднемесячном уровне $M = 508$ см. Максимум подъема ОУМ наблюдался в Северодвинске и Сосновце одновременно, примерно в 2 часа 18 ноября, а через 6 часов в Соловках. Таким образом, имел место преимущественно ветровой нагон в Двинском заливе и северо-восточной части моря, затем достигший Соловецких о-вов (БЛ-нагон). Прилив почти сизигийный: 1-я четверть – 10 ноября, полнолуние – 17 ноября.

Нагон 12 декабря 2013 г. (см. табл. 2, № 7) представляет собой типичный пример индуцированного нагона (И-нагон). В Сосновце ОУМ достиг максимума 90 см в 13:00 12 декабря ($k = 44\%$), в Северодвинске максимальное повышение ОУМ до 86 см ($k = 72\%$) произошло через 6 часов в 19:00, в Соловках ОУМ повысился до 90 см в 21:00 ($k = 81\%$). Нагон вызван глубоким циклоном первого типа, центр которого (960 гПа) 12 декабря в 12:00 находился в Печорском море. Ветер западный 10 м/с в Белом море, до 30 м/с в Баренцевом. Отметим, что этот нагон представляет один из редких случаев, при которых ОУМ в Сосновце и Соловках поднимался выше, чем в Северодвинске.

Нагон 21 ноября 2018 г. (см. табл. 2, № 11) возник в результате воздействия обширного циклона второго типа в субполярной области к северу от Баренцева и Карского морей. 20 ноября 2018 г. перед нагоном в 18:00 сформировался вторичный центр (980 гПа) в южной части Карского моря. В Баренцевом море преобладал северный ветер 15–20 м/с. Максимальное повышение ОУМ произошло: в Сосновце в 16:00 20 ноября до 70 см ($k = 34\%$), в Северодвинске в 00:00 21 ноября до 105 см ($k = 73\%$), в Соловках в 02:00 21 ноября до 80 см ($k = 72\%$). В Кандалакше максимальный подъем ОУМ до 56 см произошел в 01:00 21 ноября. Типичный И-нагон.

Нагон 04 августа 2019 г. сформировался при синоптической ситуации седьмого типа (см. табл. 2 № 13). Во время нагона центр циклона (980 гПа) 4 августа в 06:00 располагался к юго-востоку от Чешской губы, а область повышенного давления –

над Гренландией (1030 гПа). В юго-восточной части Баренцева моря длительное время дул северо-восточный ветер 18–20 м/с, в Белом море преобладал северный ветер такой же силы. В результате в Сосновце ОУМ поднялся до 46 см ($k = 17\%$) в 06:00 4 августа, затем в Северодвинске – до 98 см ($k = 58\%$) в 12:00, затем в Соловках – до 67 см ($k = 56\%$) в 18:00. Этот нагон можно отнести к индуцированным с преобладающей ролью ветрового фактора (ИВ-нагон). Во всех рассматриваемых пунктах H_0 был выше критических значений.

Сгоны. В Белом море помимо нагонов нередко происходят падения ОУМ, вызываемые метеорологическими причинами.

В целом обеспеченность отрицательных отклонений ОУМ от среднемесячных значений существенно меньше, чем положительных (рис. 4). Это говорит о том, что значительные сгоны происходят реже и по своей абсолютной величине, как правило, уступают нагонам. Однако, исключение представляет собой 2005 г., в котором произошел самый значительный сгон за рассматриваемый период времени 2004–2020 гг. (см. рис. 3А).

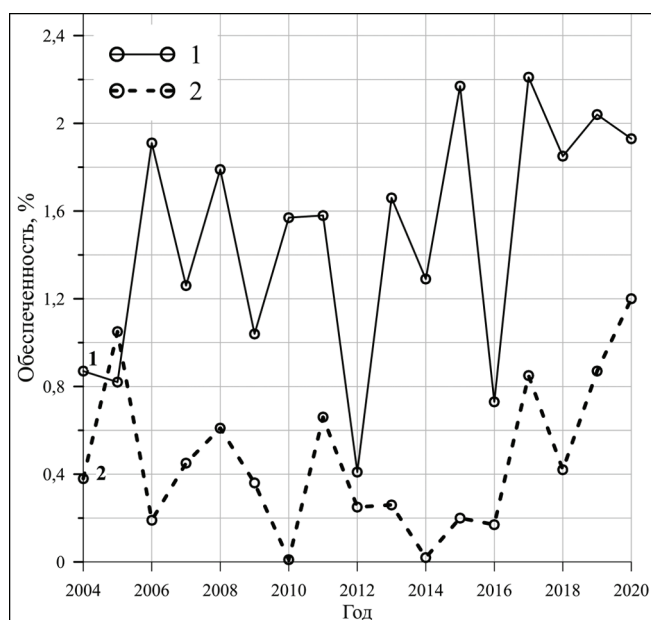


Рис. 4. Обеспеченность повышений (1) и понижений (2) ОУМ ≥ 50 см в Северодвинске в 2004–2020 гг.

Fig. 4. Probability of RSL increases (1) and decreases (2) ≥ 50 cm in Severodvinsk in 2004–2020

Ниже описаны два самых больших сгона, когда ОУМ в Северодвинске понизился на 85 см (6 ноября 2011 г.) и 123 см (31 января 2005 г.).

Сгон 31 января 2005 г. (см. рис. 3А) образовался в результате действия очень сильного (25–30 м/с) сгонного юго-западного ветра над Белым морем на периферии интенсивного глубокого (965 гПа) ци-

клона, центр которого перед сгоном и во время него находился в северной части Скандинавского п-ва, в районе м. Нордкап. Этот циклон в течение 1,5 суток оставался на одном месте, так как с востока блокировался мощным антициклоном на севере Западной Сибири с давлением в центре 1055 гПа. В Северодвинске ОУМ понизился на 123 см ниже среднемесячной отметки, в Соловках на 112 см, в Сосновце на 68 см. Этот сгон был сильнейшим за весь период 2004–2020 гг.

Сгон 6 ноября 2011 г. (см. рис. 3Б) образовался в результате действия мощного антициклона, который сформировался 5 ноября с центром (1040–1045 гПа) в районе Двинского залива. Затем центр этого антициклона сместился к юго-востоку. Таким образом, акватория Белого моря находилась в тыловой части этого антициклона и длительное время подвергалась действию сгонного юго-западного ветра порядка 15 м/с. Понижение ОУМ в Северодвинске и Соловках составило –85 см и –70 см соответственно. В других случаях при значительных сгонах понижение ОУМ было не более 70 см.

ВЫВОДЫ

Согласно данным, полученным на станциях Северодвинск и Соловки, за рассматриваемый промежуток времени наблюдается заметный рост дисперсии синоптических колебаний ОУМ. Если сравнивать пятилетние периоды, то в Северодвинске средняя дисперсия в 2004–2008 гг. была равна 327,3, в 2009–2013 гг. – 341,4, а в 2016–2020 гг. – 386,8 см². В Соловках эти величины следующие: 242,1, 258,1, 270,8 см².

Обеспеченность положительных отклонений ОУМ тем больше, чем больше дисперсия и, соответственно, наблюдается тенденция ее роста в течение

рассматриваемого промежутка времени. Представленные линейные тренды как дисперсии, так и обеспеченности, рассчитаны на 95% доверительном уровне. В этой связи также следует отметить, что за 12 лет (2004–2015) имели место всего два нагона с R_M не менее 100 см, а в пятилетний промежуток (2016–2020) таких нагонов произошло уже пять.

Наибольшей дисперсией характеризуются колебания ОУМ в Двинском заливе. На Соловках и в Сосновце колебания ОУМ обладают примерно одинаковой дисперсией, которая существенно ниже, чем в Двинском заливе. Самая низкая дисперсия наблюдается в Кандалаксе.

За рассматриваемый период времени (2004–2020) в Белом море имели место 98 случаев нагонов с максимальной высотой ОУМ относительно среднемесячного значения (R_M) в Северодвинске 50 см и выше. Описаны семь типов синоптических ситуаций, при которых в Белом море возникали нагоны. Наиболее часто нагоны возникают при прохождении западных циклонов, на долю которых приходится 73 случая из 98, т. е. 74,5%. Наибольшие по высоте нагоны имели место 15 ноября 2011 г. и 22 августа 2018 г. В Северодвинске в первом случае $R_M = 153$ см, во втором $R_M = 130$ см.

Значительные сгоны происходят реже, чем нагоны, и по своей абсолютной величине, как правило, уступают последним. В целом обеспеченность отрицательных отклонений ОУМ от среднемесячных значений существенно меньше, чем положительных. Сгон 31 января 2005 г. был сильнейшим за весь период 2004–2020 гг. В Северодвинске ОУМ понизился на 123 см ниже среднемесячной отметки, в Соловках на 112 см. В других случаях понижения ОУМ относительно среднемесячного значения при значительных сгонах были порядка 70 см.

Благодарность. Работа выполнена на кафедре океанологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в соответствии с госзаданием № 12103190090-06 «Комплексные исследования современного состояния вод Мирового океана».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. II. Белое море. Вып. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 240 с.
- Инжебейкин Ю.И. Колебания уровня Белого моря. Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2003. 152 с.
- Кислов А.В. Климатология с основами метеорологии: учебник для учреждений высш. образования. М.: Академия, 2016. 224 с.
- Кондрин А.Т. Формирование штормовых нагонов в Белом море // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 6. С. 33–40.
- Лебедева С.В., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Федорова Т.А. Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование // Геориск. 2015. № 1. С. 18–25.
- Магрицкий Д.В., Скрипник Е.Н. Опасные гидрологические процессы в устье Северной Двины и факторы их многолетней изменчивости // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 6. С. 59–70.
- Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 247 с.
- Морозова С.В., Алимпиева М.А., Короткова Н.В., Абаников В.Н. Взаимодействие объектов циркуляции и их климатическая динамика на примере центров действия атмосферы Северного полушария // Вестн. Удмуртского ун-та. Сер. Биол. науки о Земле. 2022. Т. 32. Вып. 2. С. 166–174.
- Титкова Т.Б., Михайлов А.Ю., Виноградова В.В. Арктический фронт и ледовитость Баренцева моря в зим-

- ний период // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 117–125.
- Emery W.J., Thompson R.E. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, Amsterdam, Elsevier, 2001, 638 p.
- Filatov N., Pozdnyakov D., Johannessen Ola M. et al. *White Sea. Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change*, Springer – Verlag, Berlin, Praxis Publ., Chichester, UK, 2005, 462 p.
- Foreman M.G.G. Manual for tidal heights analysis and prediction, *Pacific Marine Sci. Rep.* 77–10, Sidney, 1977, 62 p. (Reprinted 1984).
- Kondrin A.T., Korablina A.D. Synoptic Level Fluctuations of the White Sea, *Russian journal of Earth sciences*, 2023, vol. 23(1), p. 1–12, DOI: 10.2205/2023ES000836.
- Korablina A.D., Kondrin A.T., Arkhipkin V.S. Numerical simulations and statistics of surges in the White and Barents seas, *Russian journal of Earth sciences*, 2017, vol. 17, p. 1–11, ES4004, DOI: 10.2205/2017ES000608.
- Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE, *Computers and Geoscience*, 2002, vol. 28, p. 929–937.
- Электронные ресурсы
Реанализ CFSR, URL: <https://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis.php?model=cfsr> (дата обращения 22.02.2023).

Поступила в редакцию 20.04.2023

После доработки 16.06.2023

Принята к публикации 27.07.2023

WHITE SEA SURGE LEVEL FLUCTUATIONS ACCORDING TO OBSERVATION DATA 2004–2020

A.T. Kondrin¹, A.D. Korablina²

^{1,2} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology*

¹ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: alt.kondrin@yandex.ru*

² *Independent Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: jacksparrow91@bk.ru*

Fluctuations of the residual level of the White Sea in the synoptic range of time scales, including surge fluctuations, are considered on the basis of observation data covering 2004–2020 period. Hourly data on the level at coastal points of Sosnovets, Severodvinsk, Solovki and Kandalaksha were analyzed. The surge run-ups and run-offs are studied based on the analysis of residual sea level (RSL) fluctuations, which is calculated by removing the tidal component from the observation data. The Dvina Bay RSL fluctuations are characterized by the greatest variance. The RSL fluctuations at Sosnovets and Solovki have approximately the same variance, which is significantly lower than in Dvina Bay. The lowest variance is observed in Kandalaksha. According to the data obtained at the Severodvinsk and Solovki stations, a noticeable increase in the variance of RSL fluctuations is observed over the considered period of time, which indicates an increase in their intensity. If five-year periods are compared, the average dispersion in Severodvinsk is 327,3 cm² in 2004–2008, 341,4 cm² in 2009–2013, and 386,8 cm² in 2016–2020. This conclusion is confirmed by the calculations of the probability of positive RSL deviations, as well as by the fact that the number of surge run-ups with a height no less than 100 cm was only two during 12 years from 2004 to 2015, and there were already five such surges in the five-year period 2016–2020. Seven types of synoptic situations are described in which surge run-ups occurred in the White Sea, two of which were not previously considered. Western cyclones of various trajectories account for 73 (74,5%) out of 98 cases of surge run-ups considered in the paper. The largest surge run-ups in Severodvinsk during the period under review reached a height of 130 cm (August 22, 2018) and 153 cm (November 15, 2011). Significant surge run-offs are less frequent than surge run-ups, being, as a rule, lower in their absolute value. The surge run-off on January 31, 2005 was the most pronounced for the entire period 2004–2020. The RSL in Severodvinsk dropped by 123 cm below the monthly average, and by 112 cm in Solovki.

Keywords: tides, residual sea level, storm surge, variance, probability, synoptic situations, inter-annual variability

Acknowledgement. The work was carried out at the Oceanology Department, MSU Faculty of Geography, in accordance with the state assignment no. 12103190090-06 “Complex study of the current state of waters of the World Ocean”.

REFERENCES

- Emery W.J., Thompson R.E. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, Amsterdam, Elsevier, 2001, 638 p.
- Filatov N., Pozdnyakov D., Johannessen Ola M. et al. *White Sea. Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change*, Springer – Verlag, Berlin, Praxis Publishing, Chichester, UK, 2005, 462 p.

- Foreman M.G.G. Manual for tidal heights analysis and prediction. Sidney, *Pacific Marine Sci. Rep.* 77–10, 1977, 62 p. (Reprinted 1984).
- Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei SSSR, tom II, Beloe more [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR, vol. 2, White Sea], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, vyp. 1, 240 p. (In Russian)
- Inzhebeikin Yu.I. Kolebaniya urovnya Belogo moray [The White Sea level fluctuations], Ekaterinburg, URO RAN Publ., 2003, 152 p. (In Russian)
- Kislov A.V. Klimatologiya s osnovami meteorologii: uchebnik dlya stud. uchrezhdenii vyssh. obrazovaniya [Climatology with basics of meteorology: a textbook for the students of institutions of higher education], Moscow, Akademiya Publ., 2016, 224 p. (In Russian)
- Kondrin A.T., Korablina A.D. Synoptic Level Fluctuations of the White Sea, *Russian journal of Earth sciences*, 2023, vol. 23(1), p. 1–12, DOI: 10.2205/2023ES000836.
- Kondrin A.T. Formirovanie shtormovykh nagonov v Belom more [Formation of storm surges in the White Sea], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 6, p. 33–40. (In Russian)
- Korablina A.D., Kondrin A.T., Arkhipkin V.S. Numerical simulations and statistics of surges in the White and Barents seas, *Russian journal of Earth sciences*, 2017, vol. 17, p. 1–11, ES4004, DOI:10.2205/2017ES000608.
- Lebedeva S.V., Alabyan A.M., Krylenko I.N., Fedorova T.A. Navodneniya v ust'e Severnoi Dviny i ikh modelirovanie [Floods at the Northern Dvina mouth and their modeling], *Georisk.*, 2015, no. 1, p. 18–25. (In Russian)
- Magritskii D.V., Skripnik E.N. Opasnye gidrologicheskie protsessy v ust'e severnoi Dviny i faktory ikh mnogoletnei izmenchivosti [Hydrological hazards in the mouth of the Northern Dvina River and the causes of their long-term variations], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 6, p. 59–70.
- Monin A.S. *Vvedenie v teoriyu klimata* [Introduction to the theory of climate], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, 247 p. (In Russian)
- Morozova S.V., Alimpieva M.A., Korotkova N.V., Abanikov V.N. Vzaimodeistvie ob'ektov tsirkulyatsii i ikh klimaticheskaya dinamika na primere tsentrov deistviya atmosfery severnogo polushariya [Interaction of circulation objects and their climatic dynamics on the example of the atmosphere action centers of the northern hemisphere], *Vestn. Udmurtskogo un-ta, Ser. Biol. nauki o Zemle*, 2022, vol. 32, rel. 2, p. 166–174. (In Russian)
- Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE, *Computers and Geoscience*, 2002, vol. 28, p. 929–937.
- Titkova T.B., Mikhailov A.Yu., Vinogradova V.V. Arkticheskii front i ledovitost' Barentseva morya v zimnii period [Arctic front and ice coverage of the Barents Sea in winter], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, vol. 11, no. 3, p. 117–125. (In Russian)

Web source

Data of Climate Forecast System Reanalysis, URL: <https://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis.php?model=cfsr> (access date 22.02.2023).

Received 20.04.2023

Revised 16.06.2023

Accepted 27.07.2023