

УДК 525.623

А.Т. Кондрин¹**ФОРМИРОВАНИЕ ШТОРМОВЫХ НАГОНОВ В БЕЛОМ МОРЕ**

Рассмотрены характеристики и особенности формирования штормовых нагонов в Белом море на основании данных наблюдений на станциях, расположенных в Горле, Двинской Губе, Кандалакшском заливе и на Соловецком архипелаге.

Установлено, что в ряде случаев проходящие циклоны генерируют в Баренцевом море барическую волну, которая проникает в Белое море и индуцирует нагон. Гребень нагонной волны сначала проходит станцию Сосновец, примерно через 7 ч. – Северодвинск, еще через 2 ч. – Соловки. Наибольшая высота нагонной волны (0,9 м) наблюдалась 12 декабря 2013 г. При отсутствии существенного ветрового воздействия в акватории Белого моря высота нагона при прохождении волны практически не изменяется.

Ветровое воздействие приводит к трансформации волновых нагонов. Нагон может быть образован действием ветра без участия волновой составляющей. В наибольшей степени ветровой фактор проявился в Двинской губе, где 6 ноября 2010 г. произошел наибольший из рассмотренных здесь нагон (1,08 м в Северодвинске и 1,22 м на станции Соломбала). Этот нагон, при северо-западном ветре, возник сначала в Двинской губе, а затем достиг других частей моря.

В большинстве рассмотренных случаев вклад сил давления был основным. При этом на станции Сосновец, как правило, имела место высокая отрицательная корреляция (–0,8) между среднесуточными значениями приземного давления атмосферы и остаточного уровня моря. Лишь во время максимального ветрового нагона в Двинской губе 6 ноября 2010 г. вклад сил давления был относительно невелик. Ветровая составляющая при этом была наибольшей – 56%. Перед нагоном, как правило, наблюдался сгон. Самый значительный из них произошел 27 ноября 2013 г., когда на станции Северодвинск остаточный уровень моря (ОУМ) опустился ниже среднего значения на 0,54 м. Перепад ОУМ в этом случае был равен 1,35 м, что сопоставимо с величиной прилива.

Ключевые слова: остаточный уровень моря, статическая реакция уровня моря, уединенная нагонная волна, относительный вклад сил давления и ветра, синоптические условия, Белое море.

Введение. Рассмотрены штормовые нагоны в Белом море на основании данных наблюдений на четырех водомерных постах, расположенных в Горле, Двинской Губе, Кандалакшском заливе и на Соловецком архипелаге.

Штормовые нагоны в Белом море возникают главным образом при прохождении западных циклонов, сформированных на Арктическом и Полярном климатических фронтах. Повторяемость таких циклонов, по данным более ранних исследований, составляет 88% [Filatov et al., 2005]. Штормовые нагоны возникают в результате действия трех факторов: изменений атмосферного давления, вызывающих статическую реакцию уровня моря согласно закону «обратного барометра»; динамического воздействия на морскую воду движущихся барических систем и непосредственно ветрового воздействия. Атмосферные факторы всегда действуют совместно, тем не менее, в зависимости от барической ситуации, тот или иной фактор может преобладать. В работе автора [Кондрин, 2015] на основании данных наблюдений на Беломорской биологической станции МГУ имени М.В. Ломоносова (ББС) в Кандалакшском заливе описаны три основных типа нагонов: барические, представляющие собой статическую реакцию уровня моря на достаточно продолжительное понижение приземного давления ат-

мосферы (ПДА); ветровые, возникающие в результате действия нагонного ветра; волновые, индуцированные барической волной, пришедшей из Баренцева моря.

В статье на основании данных наблюдений на 4 водомерных постах рассмотрены колебания остаточного уровня моря (ОУМ) в синоптическом временном масштабе, что позволило более углубленно изучить характеристики и особенности формирования штормовых нагонов в различных синоптических ситуациях. При этом дана оценка относительной роли основных метеорологических факторов, таких, как колебания атмосферного давления и ветровое воздействие.

Материалы и методы исследований. Для интерпретации результатов наблюдений применялись некоторые приближенные теоретические оценки.

Динамическая реакция океана на колебания атмосферного давления при прохождении барических систем оценивается с помощью формулы Proudman [Proudman, 1953]

$$\mu = \frac{\Delta\zeta}{\Delta\zeta_0} = \frac{1}{1 - U^2/gH}, \quad (1)$$

где $\Delta\zeta_0$ – равновесное статическое возвышение уровня, $\Delta\zeta_0 = -\Delta P_a/\rho g$, ΔP_a – изменение атмосферного давления, рассчитываемое как разность сред-

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: altkondr@gmail.com

немесячного ПДА и ПДА в центре циклона; $\Delta\zeta$ – возвышение уровня, вызванное движущейся барической системой; ρ – плотность воды; U – скорость перемещения атмосферного возмущения; H – глубина моря; μ – безразмерный коэффициент динамической реакции океана, учитывающий эффект движения барической системы. Для акватории Белого моря при применении формулы (1) в качестве характерной глубины (H) принимается значение 50 м, так как станции Сосновец, Северодвинск и Соловки расположены в менее глубокой части моря по сравнению с западной частью Бассейна и Кандалакшским заливом. Для Баренцева моря в качестве характерной глубины принято значение 200 м.

Изменение высоты нагонной волны при выходе на мелководье оценивалось при помощи приближенного соотношения [Lacombe, 1965]

$$\frac{h^4}{h_0^4} = \frac{H_0}{H}, \quad (2)$$

где H_0 и h_0 – исходные значения глубины и высоты волны, H и h – соответствующие значения на мелководье. Формула (2) применялась для Воронки Белого моря при $H_0 = 200$ м и $H = 30$ м.

Для оценки скорости приземного ветра использована формула [Рабинович, 1993]:

$$W = kW_g = \frac{k}{\rho_a f} \left(\frac{\Delta P_a}{L} \right), \quad (3)$$

где W_g – геострофический ветер; $k \approx 0,7$ – коэффициент, обусловленный приземным трением; $\rho_a \approx 1,25$ кг/м³ – плотность воздуха; f – параметр Кориолиса; L – расстояние, соответствующее перепаду давления ΔP_a . Отметим, что скорость ветра, рассчитанная по формуле (3), на основании данных, снятых с карт ПДА [http://www.wetterzentrale.de], вполне удовлетворительно согласуется по величине и направлению с данными измерений на станции Сосновец.

Оценка влияния ветра основана на уравнении [Bowden, 1983]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} = C \frac{\tau}{\rho g H},$$

где ζ – возмущение уровня, ρ – плотность морской воды, H – глубина, τ – касательное напряжение ветра на поверхности моря. В работе использованы значения τ из работы [Bowden, 1983], полученные многими авторами над морской поверхностью в условиях нейтральной стратификации. Это уравнение выведено для узкого и вытянутого канала, закрытого с одной стороны, если касательное напряжение ветра направлено вдоль его оси. Однако оно вполне применимо при северо-западном ветре для заливов произвольной формы, таких, как Воронка и Двинская губа, оси которых ориентированы с юго-востока на северо-запад. Используя последнее уравнение при ветровом разгоне в направлении оси залива Δx , можно записать

$$\Delta \zeta_W = C \Delta x \frac{\tau}{\rho g H}, \quad (4)$$

где $\Delta \zeta_W$ – возмущение уровня, вызванное действием ветра. Для глубины 50 м и более значение этого коэффициента принимается равным 1. При оценке ветрового нагона в Двинской губе при действии северо-западного ветра в качестве разгона Δx принимается расстояние вдоль оси залива на северо-запад до побережья Кольского п-ова, равное 250 км, средняя глубина по этой линии составляет около 50 м. Для Воронки Белого моря при северо-западном ветре вдоль побережья Кольского п-ова величина Δx принимается равной 700 км, а глубина – 200 м.

В работе использованы данные наблюдений на станциях Сосновец, Северодвинск, Соломбала и Соловки, а также на ББС. Приливные колебания получены путем гармонического анализа данных наблюдений над уровнем с помощью метода наименьших квадратов [Pawlowicz et al., 2002; Кондрин, Пантюлин, 2010]. 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 приливных частотах был применен фильтр Баттерворта с частотой среза 0,04 ц/ч, соответствующей периоду 25 ч. [Кондрин, 2012; Emery, Thompson, 2001]. Повышения и понижения ОУМ во время нагонов и сгонов, а также изменения ПДА приведены относительно среднемесячных значений.

Результаты исследований и их обсуждение.
Западные циклоны, проходящие над акваторией Баренцева моря. Нагон 16–18 августа 2010 г. был вызван достаточно глубоким циклоном западного типа, центр которого (995–975 ГПа) со скоростью не более 20 км/ч перемещался из центральной части Баренцева моря в северо-восточном направлении к Новой Земле. При прохождении циклона понижение ПДА составило 22 ГПа. Циклон был малоподвижен 16, 17 и 18 августа и медленно смещался на юго-восток вблизи Новой Земли, следовательно, повышение ОУМ в Баренцевом море, вызвавшее нагонную волну, было связано со статической реакцией моря на понижение ПДА согласно закону «обратного барометра». При входе в Воронку Белого моря высота этой волны возросла до 0,39 м. Согласно наблюдениям на станции Сосновец наибольшая высота нагона 0,41 м была достигнута 16 августа в 23:00, а на станции Соловки через 9 ч. – 17 августа в 08:00. Однако здесь высота нагона уменьшилась до 0,26 м в результате действия сгонного ветра. Наиболее длительный нагон наблюдался на станции Северодвинск, где уровень начал расти 15 августа и к 13:00 16 августа достиг высоты 0,4 м, т.е. раньше, чем на станции Сосновец, и оставался вблизи этого значения до 18 августа, причем 18 августа в 15:00 высота ОУМ достигла 0,43 м. Видимо, продолжительность этого нагона в Двинской губе объясняется действием ветра. Дей-

ствительно, с 16 по 18 августа над акваторией Белого моря преобладал сильный ветер западных румбов со скоростью около 10 м/с, что подтверждается измерениями на ББС, где временами порывы ветра достигали 13 и даже 18 м/с.

На всех трех станциях перед нагоном наблюдался сгон, причем наибольшее понижение ОУМ (до $-0,27$) м отмечено на станции Соловки 15 августа. Статическое повышение уровня в Белом море в эти дни не происходило, так как ПДА оставалось на уровне среднемесячного значения (1012 ГПа) с небольшими отклонениями около этой величины. Во время этого нагона отмечена сильная отрицательная корреляция между среднесуточными значениями ПДА в Баренцевом море и ОУМ на станциях Сосновец ($R_{БРМ} = -0,84$) и Соловки ($R_{БРМ} = -0,8$). Здесь и далее $R_{БРМ}$ ($R_{БЛМ}$) – коэффициент корреляции между среднесуточными значениями ПДА в центральной части Баренцева (Белого) моря и ОУМ на соответствующей станции. Итак, рассматриваемый нагон был индуцирован волной, возникшей в Баренцевом море в результате действия сил давления. На станции Соловки и особенно в Двинской губе характеристики нагона отражают влияние ветра. На станции Сосновец высота подъема ОУМ в основном определялась нагонной волной.

Нагон 12 декабря 2013 г. (рис. 1) возник при прохождении глубокого западного циклона над акваторией Баренцева моря. Его центр (960 ГПа) 12 декабря находился в западной части Баренцева моря, 13 декабря переместился в Печорское море (965 ГПа). При скорости движения около 40 км/ч и перепаде ПДА около 38 ГПа этот циклон в результате действия сил давления генерировал в Баренцевом море нагонную волну высотой 0,4 м. При входе в Воронку Белого моря за счет уменьшения глубины высота волны возросла до 0,71 м. Северо-западный ветер вдоль побережья

Кольского п-ова (от 15 до 20 м/с) привел к повышению ОУМ приблизительно на 0,25 м. Таким образом, теоретическая оценка дает величину нагона 96 см.

На станции Сосновец 12 декабря в 13:00 наблюдался подъем ОУМ на 0,9 м, на станции Северодвинск – 0,86 м (20:00) и на станции Соловки – 0,9 м (22:00). По мере распространения в Белом море высота нагонной волны практически не изменялась. Нагон был полностью индуцирован волной из Баренцева моря. Это предположение подтверждается высокой отрицательной корреляцией между среднесуточными значениями ПДА в Баренцевом море и ОУМ на станции Сосновец ($R_{БРМ} = -0,77$).

Перед описываемым нагоном наблюдался сильный сгон. Например, на станции Северодвинск 11 декабря в 16:00 ОУМ опустился ниже среднего значения на 0,45 м. Затем ОУМ быстро возрастал и в течение 28 ч. достиг наивысшей отметки 0,86 м (12 декабря в 20:00). Таким образом, перепад уровня составил 1,31 м.

Приведенные выше результаты подтверждают, что в ряде случаев циклоны, проходящие над акваторией Баренцева моря, генерируют барическую волну, которая затем проникает в Белое море и индуцирует нагон [Инжебейкин, 2003].

Нагон 23–24 апреля 2014 г. был вызван средним по глубине циклоном, центр которого (990–985 ГПа) 22 апреля находился в западной части Баренцева моря, а 23 апреля переместился в район Югорского п-ова. Скорость движения этой барической системы составила около 52 км/ч, а перепад ПДА – 15 ГПа, что соответствует статическому повышению ОУМ на 0,15 м. С учетом динамического эффекта ($\mu = 1,12$) силы давления создали в Баренцевом море нагонную волну высотой 0,17 м. В Воронке ее высота возросла до 0,3 м. В результате действия северо-западного ветра (15 м/с) вдоль

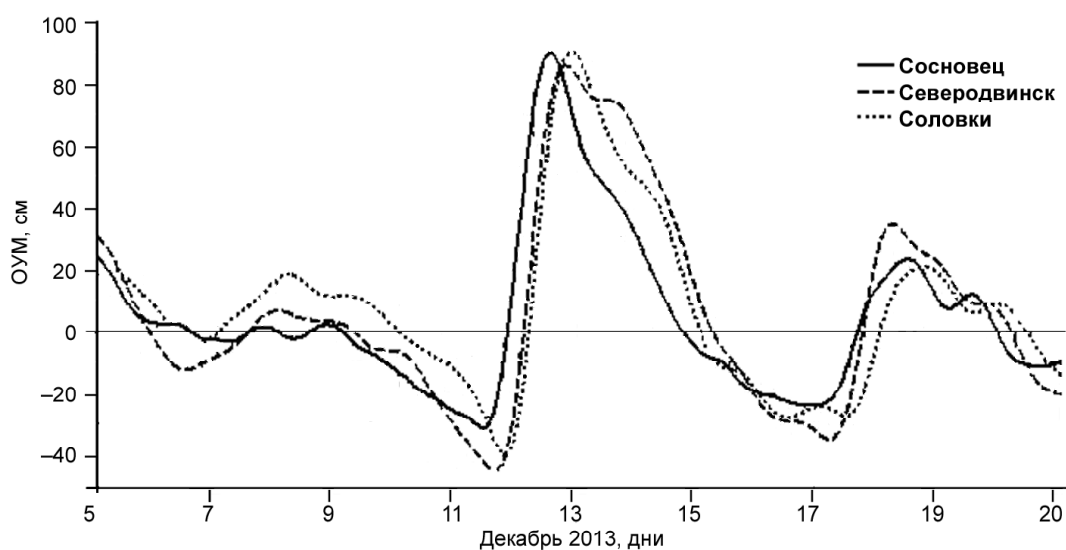


Рис. 1. Волновой нагон 12 декабря 2013 г. Здесь и на других рисунках по оси ординат – отклонение ОУМ от среднемесячного значения в см

Fig. 1. The wave surge of December 12, 2013. Here, as well as in other figures, the deviation of residual sea level (cm) from the monthly mean value is plotted on the Y-axis

побережья Кольского п-ова высота этой волны, согласно уравнению (4), возросла до 0,48 м. В Белом море 22 апреля 2014 г. дул западный ветер (12 м/с), способствовавший притоку воды к Горлу и в Двинскую губу. На станции Сосновец в горле Белого моря 23 апреля в 19:00 зафиксирован максимум нагона (0,7 м), который достиг станции Северодвинск 24 апреля в 02:00 (0,67 м), а станции Соловки – в 04:00 того же дня (0,47 м). Можно сделать вывод, что рассматриваемый нагон был индуцирован волной, возникшей в Баренцевом море в результате действия движущегося циклона, усиленной действием нагонного ветра и проникшей затем в Белое море. В Горле Белого моря и Двинской губе высота этого нагона возросла в результате действия западного ветра. На станции Соловки высота нагона полностью определялась пришедшей из Баренцева моря волной. Вклад сил давления в данном случае составил от 43% на станции Сосновец до 64% на станции Соловки. Значимая корреляция между колебаниями ПДА и ОУМ отсутствовала из-за активной роли ветрового фактора.

Нагон 6 ноября 2010 г. (рис. 2) был вызван глубоким циклоном западного типа, который 4–6 ноября перемещался над южной частью Баренцева моря в восточном направлении со скоростью около 25 км/час. Центр этого циклона (975 ГПа) 6 ноября находился над Югорским полуостровом, причем Белое море оказалось в его тыловой части, где господствовали сильные нагонные северные и северо-западные ветры со скоростью до 21 м/с. Понижение 5 ноября ПДА на 20 ГПа вызвало в Баренцевом море барическую волну высотой 0,2 м, которая в Воронке Белого моря при выходе на мелководье могла достичь 0,36 м. На станции Сосновец эта волна проявилась 5 ноября в 10:00 перед основным нагоном в виде отдельного максимума.

По данным наблюдений в Северодвинске 6 ноября около 08:00 ОУМ поднялся до 1,08 м относи-

тельно среднемесячного значения, а на станции Соломбала в 10:00 – до 1,22 м. В 12:00 того же дня этот нагон достиг станции Сосновец (0,62 м), а несколько позже – в 14:00 – станции Соловки (0,7 м). Отсюда следует, что этот нагон первоначально сформировался в Двинской губе при преобладающем действии ветрового фактора, а затем распространился в другие части Белого моря.

В Белом море, как отмечено выше, господствовал нагонный северо-западный ветер со скоростью до 21 м/с. При прохождении циклона понижение ПДА над акваторией Белого моря относительно среднемесячного значения составило 28 ГПа, что привело к повышению ОУМ с учетом динамического эффекта ($\mu = 1,1$) на 0,31 м. В результате действия ветра повышение ОУМ для вершины Двинской губы согласно уравнению (4) составило около 0,6 м, что составляет 56% от высоты нагона, полученной на основании данных наблюдений. Отсюда следует, что при формировании описываемого нагона преобладающую роль играл ветровой фактор. Теоретическая оценка превышения ОУМ над средним значением дает величину 0,91 м. По данным наблюдений высота нагона в Северодвинске была на 0,17 м больше. Возможно, это объясняется влиянием волны, пришедшей перед основным нагоном из Баренцева моря и зафиксированной на станции Сосновец. Можно предположить также, что при сильном нагоне существенную роль играет взаимодействие нагона с приливом. Согласно [Bernier, Thompson, 2007], такое взаимодействие может привести к повышению высоты нагона на 0,2 м.

Циклоны, проходящие над акваторией Белого моря. Нагон 18 ноября 2013 г. был связан с очень глубоким циклоном, центр которого (955 ГПа) 16 ноября находился на границе Норвежского и Баренцева морей в районе о-ва Медвежий. Перед этим нагоном 16 ноября наблюдался сгон. На станции Северодвинск в 06:00 ОУМ понизился до –0,29 м, а

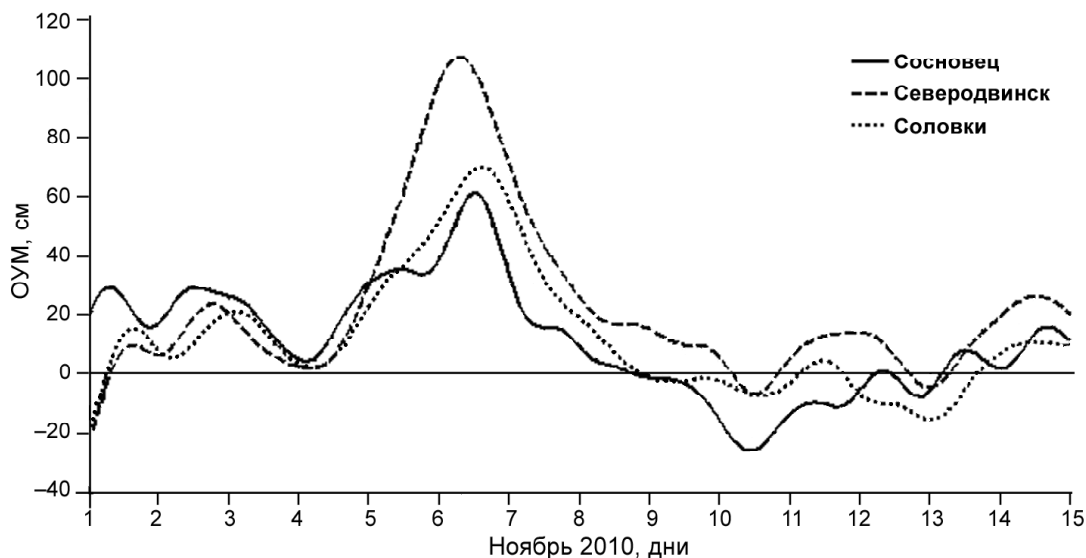


Рис. 2. Ветровой нагон 6 ноября 2010 г.

Fig. 2. The wind surge of November 6, 2010

на станции Соловки в 09:00 – до $-0,32$ м. Этот сгон был создан довольно сильным юго-западным ветром (около 15 м/с), который возник в Белом море на периферии этого циклона. В центральной и восточной частях Баренцева моря этот же циклон создал ветер южных румбов со скоростью до 20 м/с, который способствовал притоку воды в восточную половину моря, в том числе и к Воронке Белого моря. В результате в Горле Белого моря отток воды в сторону Воронки под действием юго-западного ветра блокировался притоком воды из Баренцева моря, поэтому сгон на станции Сосновец был минимален.

На периферии этого циклона в северной части Швеции 17 ноября возник еще один центр низкого ПДА (970 ГПа), который с большой скоростью (65 км/ч, $\mu = 2,0$) двигался в юго-восточном направлении и 18 ноября оказался над территорией Республики Коми. При прохождении этого циклона над акваторией Белого моря на всех трех станциях наблюдался быстрый рост ОУМ, связанный с существенным ослаблением сгонного ветра и понижением ПДА (17 ноября на 28 – 30 ГПа по данным ББС). Таким образом, силы давления привели к повышению уровня на $0,6$ м, при этом на станции Сосновец $R_{\text{БЛМ}} = -0,76$. Максимальная высота уровня была достигнута 18 ноября одновременно (в 03:00) на станции Сосновец ($0,54$ м) и Северодвинск ($0,94$ м), а позже (в 09:00) на станции Соловки ($0,47$ м). Отметим, что перепад ОУМ относительно величины сгона для станции Сосновец составил $0,68$ м, для станций Соловки и Северодвинск $-0,79$ и $1,23$ м, соответственно.

Над Белым морем 18 ноября господствовал северо-западный ветер со скоростью около 15 – 16 м/с. Согласно расчетам по уравнению (4) для Двинской губы получаем ветровое повышение уровня от $0,25$ до $0,3$ м. Суммарная теоретическая высота нагона в результате действия сил давления и ветра в Двинской губе равна $0,85$ – $0,9$ м. Повышение ОУМ в результате действия сил давления составило около 64% от измеренной величины $0,94$ м ($R_{\text{БЛМ}} = -0,53$). Увеличение высоты нагона в Двинской губе по сравнению с другими станциями произошло в основном в результате действия ветра.

Нагон 29 ноября 2013 г. сформировался в Белом море при прохождении глубокого циклона, центр которого (970 ГПа) 28 ноября находился над Кандалакшским заливом, а 29 ноября – в районе г. Ухта (Республики Коми). Скорость движения этого циклона составила около 38 км/ч ($\mu = 1,29$). На ББС 28 ноября зафиксировано понижение ПДА до 965 ГПа, следовательно, понижение ПДА относительно среднемесячного значения равно 32 – 33 ГПа. В Белом море силы давления вызвали повышение ОУМ на $0,42$ м. На станции Сосновец по данным наблюдений произошло повышение ОУМ до $0,35$ м (29 ноября около 04:00). На станции Северодвинск высота нагона была значительно больше ($0,81$ м) и достигла этой величины в 10:00. Увеличение высоты нагона на станции Северодвинск произошло в результате совместного действия сил давления и ветра непосредственно в Белом море. Белое море 29 ноября оказалось в ты-

ловой части циклона, где господствовал сильный нагонный северо-северо-западный ветер со скоростью около 17 м/с. На ББС наблюдался северо-западный ветер, порывами до 20 м/с. При такой скорости ветра, согласно уравнению (4), подъем ОУМ в вершине Двинской губы мог достигнуть $0,35$ м (43%). Таким образом, в результате расчетов получена величина ОУМ $0,77$ м, которая согласуется с данными наблюдений для станции Северодвинск. Вклад сил давления при этом составил 52% . Сформированный при активной роли ветра нагон в Двинской губе затем достиг станции Соловки, где его максимальная высота ($0,56$ м) наблюдалась около 13:00. Вклад сил давления здесь оценивается в 75% .

Перед этим нагоном 27 ноября наблюдался сильный сгон в результате действия юго-западного ветра. Наибольшей величины ($-0,54$ м) он достиг на станции Северодвинск в 20:00. На станции Сосновец минимум ОУМ ($-0,33$ м) наблюдался в 11:00, на станции Соловки ($-0,38$ м) – в 23:00. Таким образом, на станции Северодвинск перепад ОУМ достиг величины $1,35$ м (рис. 3).

Нагон 24–25 апреля 2010 г. был вызван южным циклоном, который зародился 23 апреля южнее Белого моря в западной части Вологодской области. Его центр (985 ГПа) 24 апреля был расположен на востоке от Горла Белого моря между Двинской и Мезенской губой, а 25 апреля (980 ГПа) – у южной оконечности Новой Земли. Скорость его перемещения в среднем была равна 40 км/ч, при которой коэффициент динамического усиления (μ) составил $1,34$. При прохождении над акваторией Белого моря этот циклон вызвал снижение ПДА на 28 ГПа, что вызвало повышение ОУМ за счет сил давления приблизительно на $0,38$ м. На станции Сосновец, где 24 апреля в 16:00 произошел подъем ОУМ до $0,52$ м относительно среднемесячного значения, это повышение выразилось наиболее отчетливо. На двух других станциях этому моменту времени соответствуют характерные изгибы кривой хода ОУМ. Высокая отрицательная корреляция во время нагона между среднесуточными значениями ПДА в Белом море и ОУМ на станции Сосновец ($R_{\text{БЛМ}} = -0,82$) указывает на основную роль сил давления при формировании этого нагона в Горле Белого моря. На станции Северодвинск основной подъем до высоты $0,62$ м произошел 25 апреля в 09:00 при существенной роли ветрового фактора. Здесь северо-западный ветер со скоростью около 14 м/с вызвал дополнительное повышение ОУМ, которое согласно расчетам по уравнению (4) составило $0,21$ м. Таким образом, теоретическая оценка дает высоту нагона около $0,58$ м. В Двинской губе в результате действия ветра высота нагона значительно возросла, причем произошла задержка во времени достижения максимума ОУМ, который наблюдался здесь на 17 ч. позднее, чем на станции Сосновец. На станции Соловки максимальный подъем ОУМ до $0,42$ м имел место в 13:00 того же дня, следовательно, сформированный в Двинской губе нагон через 4 ч. в ослабленном виде достиг станции Соловки.

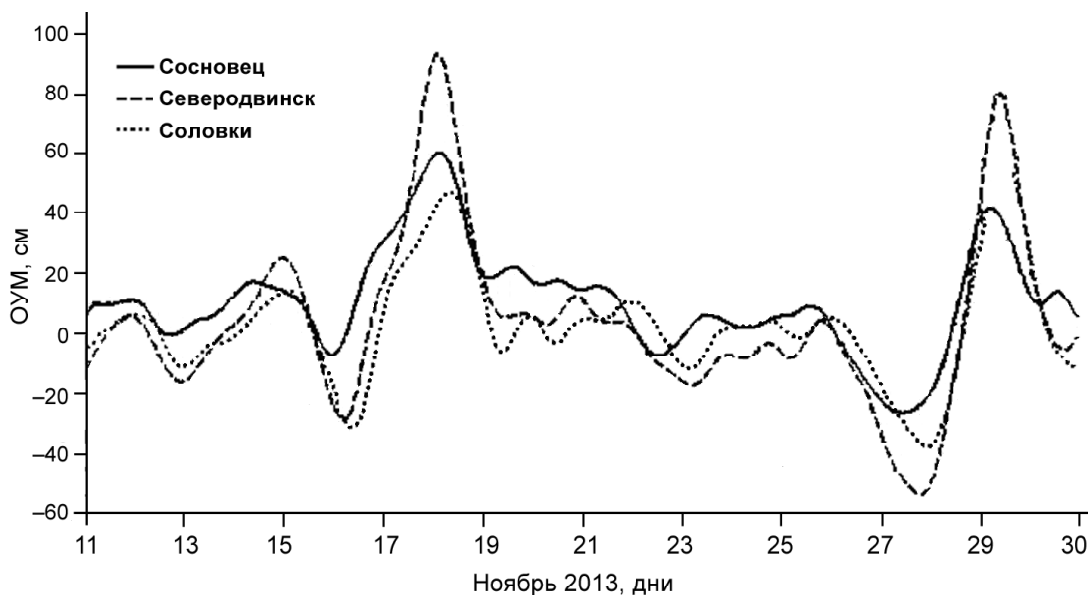


Рис. 3. Колебания ОУМ в ноябре 2013 г.

Fig. 3. The RSL oscillations in November 2013

Выводы:

– подтверждено, что в ряде случаев циклоны, проходящие над акваторией Баренцева моря, генерируют барическую волну, которая затем проникает в Белое море и индуцирует нагон. Гребень нагонной волны сначала проходит станцию Сосновец, приблизительно через 7 ч. – Северодвинск, еще через 2 ч. – Соловки. В одном из рассмотренных случаев (29 ноября 2013 г.) нагон был связан с приходом в Горло Белого моря барической волны, возникшей в южной части Баренцева моря при прохождении глубокого циклона над акваторией Белого моря;

– высота нагона зависит от глубины циклона и скорости его движения. Наибольшая высота нагонной волны (0,9 м) наблюдалась 12 декабря 2013 г. при прохождении глубокого (960 ГПа) циклона со средней скоростью 40 км/ч над акваторией Баренцева моря;

– при отсутствии существенного ветрового воздействия в акватории Белого моря высота нагона при прохождении волны практически не изменяется. Коэффициент корреляции между среднесуточными значениями ПДА в центральной части Баренцева моря и ОУМ на станции Сосновец во время таких нагонов достигает $-0,84$. Такие ситуации возможны, если ко времени прихода нагонной волны Белое море находится вне породившей ее барической системы;

– в большинстве рассмотренных случаев вклад сил давления был основным. В Белом море при его малой средней глубине важную роль играет дина-

мическая составляющая ($\mu = 1,3-2,0$). Лишь во время максимального ветрового нагона в Двинской губе 6 ноября 2010 г. вклад сил давления был относительно невелик;

– ветровое воздействие приводит к существенной трансформации волновых нагонов, которая выражается главным образом в изменениях высоты ОУМ. Когда Белое море оказывается в тыловой части циклона, где господствуют ветры северных румбов, нагон может быть образован воздействием ветра без участия волновой составляющей;

– в наибольшей степени ветровой фактор проявляется в Двинской губе, где 6 ноября 2010 г. отмечен наибольший из рассмотренных в статье ветровой нагон высотой 1,08 м. В зависимости от синоптической ситуации максимум нагона наблюдается в различной последовательности. При северо-западном ветре максимальный нагон формируется сначала в Двинской губе, а затем достигает других частей моря. При северо-восточном ветре повышение ОУМ возникает сначала у юго-западного берега (Соловки);

– перед нагоном в большинстве случаев наблюдался сгон. Самый значительный из них произошел 27 ноября 2013 г., когда на станции Северодвинск ОУМ опустился ниже среднего значения на 0,54 м, 11 декабря также на станции Северодвинск перед нагоном ОУМ опустился на 0,45 м ниже среднего значения. Перепад ОУМ в этих случаях был равен 1,35 и 1,31 м, соответственно, что сопоставимо с величиной прилива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Инжебейкин Ю.И.* Колебания уровня Белого моря. Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2003. 152 с.
- Кондрин А.Т.* Неприливные колебания уровня моря в районе Беломорской биологической станции МГУ // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 3. С. 80–85.
- Кондрин А.Т.* Штормовые нагоны в районе Беломорской биологической станции МГУ // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 6. С. 96–107.
- Кондрин А.Т., Пантюлин А.Н.* Приливные колебания уровня в эстуарной системе Великая Салма–Ругозерская губа Белого моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 6. С. 67–72.
- Рабинович А.Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 325 с.
- Bernier N.B., Thompson K.R.* Tide-surge interaction off the east coast of Canada and northeastern United States // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. C06008.
- Bowden K.F.* Physical oceanography of coastal waters. N.Y.: Ellis Horwood Ltd., 1983. 302 p.
- Emery W.J., Thompson R.E.* Data analysis methods in physical oceanography. Amsterdam: Elsevier, 2001. 638 p.
- Filatov N., Pozdnyakov D., Johannessen O.M.* et al. White Sea. Its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 462 p.
- Lacombe H.* Course d'oceanographie physique. Paris: Gauthiers-Villars, 1965. 392 p.
- Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S.* Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE // Compute. and Geosci. 2002. Vol. 28. P. 929–937.
- Proudman J.* Dynamical Oceanography. London, Methuen, New York: Wiley, 1953, 409 p.

Поступила в редакцию 09.06.2016
Принята к публикации 26.07.2016

А.Т. Kondrin¹

**FORMATION OF STORM SURGES
IN THE WHITE SEA**

The characteristics and specific features of storm surges formation in the White Sea are investigated basing on the observations at the stations located in the Gorlo (Neck), Dvina Bay, Kandalaksha Bay and on the Solovetsky archipelago.

It was found that in some cases the passing cyclones generate a pressure wave in the Barents Sea that penetrates into the White Sea, and induces the surge. The crest of the surge wave first passes the Sosnowiec station, then in about 7 h the Severodvinsk station and after 2 h more reaches the Solovki. The maximum height of surge wave (0.9 m) was observed on December 12, 2013. In the absence of significant effects of the wind in the White Sea, the height of the surge is practically constant during the passage of the wave.

Wind action results in the transformation of wave surges. The wind factor reached its maximum in the Dvina Bay, where on November 6, 2010, the highest ever surge was recorded (1.08 m at Severodvinsk and 1.22 m at Solombala station). Under the northwesterly wind this surge came first in the Dvina Bay, and then reached other parts of the sea.

In most cases, pressure forces made the major contribution. Herewith, as a rule, there was a high negative correlation (-0.8) between the average daily values of surface atmosphere pressure and the residual sea level at the Sosnowiec station. Only during the maximum wind surge in the Dvina Bay of November 6, 2010 the contribution of pressure forces was relatively small. Wind component in this case was the highest (56%). The down-surge is quite usual phenomenon before the surge. The most significant one was recorded on 27 November, 2013, when the residual sea level fell 0.54 m below average at the Severodvinsk station. The residual level range in this case was 1.35 m, which is comparable with tide magnitude.

Key words: residual sea level, sea level static response, solitary surge wave, relative contribution of pressure and wind forces, synoptic conditions, the White Sea.

REFERENCES

- Bernier N.B., Thompson K.R.* Tide-surge interaction off the east coast of Canada and northeastern United States // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. C06008.
- Bowden K.F.* Physical oceanography of coastal waters. N.Y.: Ellis Horwood Ltd., 1983, 302 p.
- Emery W.J., Thompson R.E.* Data analysis methods in physical oceanography. Amsterdam: Elsevier, 2001, 638 p.
- Filatov N., Pozdnyakov D., Johannessen O.M.* et al. White Sea. Its marine environment and ecosystem dynamics influenced by global change. Berlin: Springer-Verlag, 2005, 462 p.
- Inzhebeikin Yu.I.* Kolebaniya urovnya Belogo morya [The White Sea level oscillations], Ekaterinburg, Izdatelstvo Uralskogo otdeleniya RAN, 2003, 152 p. (in Russian).
- Kondrin A.T.* Neprilivnye kolebaniya urovnya morya v rayone Belomorskoy Biologicheskoy stantsii MGU [Non-tidal sea level oscillations in the region of the MSU White Sea Biologic station], Vestnik Moscovskogo Universiteta, seria 5, Geografiya, 2012, no 3, pp. 80–85 (in Russian).
- Kondrin A.T.* Shtormovye nagony v rayone Belomorskoi biologicheskoi stantsii MGU [Storm surges in the vicinity of the

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: altkondr@gmail.com

White Sea biological Station of the Moscow State University], Vestnik Moskovskogo Universiteta, seria 5, Geografiya, 2015, no 6, pp. 96–107 (in Russian).

Kondrin A.T., Pantiulin A.N. Prilivnye kolebaniya urovnya v estuarinoj sisteme Velikaya Salma – Rugoserskaya guba Belogo morya [Sea level tidal oscillations in the estuarine system Velikaya Salma – Rugoserskaya guba of the White Sea], Vestnik Moskovskogo Universiteta, seria 5, Geografiya, 2010, no 6, pp. 67–72 (in Russian).

Lacombe H. Course d'oceanographie physique. Paris: Gauthiers-Villars, 1965. 392 p.

Pawlowicz R., Beardsley B., Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE // Compute. and Geoscience. 2002. Vol. 28. P. 929–937.

Proudman J. Dynamical Oceanography. London, Methuen, N.Y.: Wiley, 1953. 409 p.

Rabinovich A.B. Dlinnye gravitatsionnye volny v okeane: zakhvat, rezonanse, izlucheniye [Long waves in the ocean: trapping, resonance, emitting]. SPb., Gidrometeoizdat, 1993, 325 p. (in Russian).

Received 09.06.2016

Accepted 26.07.2016