

## ВЛИЯНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ НА УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ БЕЛОГО МОРЯ

канд. геогр. наук В.В.ДРОЗДОВ

Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), Санкт-Петербург, vladidrozдов@yandex.ru.

*Рассмотрены региональные особенности циркуляции водных масс и динамики уровенного режима Белого моря. Проанализированы степень и характер связи между различными вариантами индекса Северо-Атлантического колебания (North Atlantic Oscillation – NAO), формами циркуляции атмосферы по Вангенгейму–Гирсу и многолетней динамикой уровня Белого моря. Установлены тесные зависимости между показателями интенсивности и направленности циркуляции атмосферы и изменчивостью уровенной поверхности Белого моря в различных районах.*

*Ключевые слова:* Баренцево море, циркуляция атмосферы, уровенный режим, индекс Северо-Атлантического колебания.

### ВВЕДЕНИЕ

Белое море принадлежит к морям Северного Ледовитого океана, но это единственное из арктических морей, которое почти целиком лежит к югу от полярного круга, за исключением только самых северных районов. Его площадь равна 90 тыс. км<sup>2</sup>, объем – 6 тыс. км<sup>3</sup>, средняя глубина – 67 м, наибольшая глубина – 350 м. Мелководность северной части моря и района Горла по сравнению с центром моря – Бассейном затрудняет его водообмен с Баренцевым морем, что отражается на гидрологических условиях Белого моря.

К наиболее важным гидрологическим проблемам региона следует отнести исследование причин и закономерностей общей циркуляции вод моря, динамики уровенной поверхности под влиянием региональных и крупномасштабных процессов циркуляции океана и атмосферы, а также изменчивости объемов речного стока. Очевидно, что от уровенного режима Белого моря будет во многом зависеть интенсивность его водообмена с Баренцевым морем, что в свою очередь имеет важные гидрохимические и гидробиологические следствия. Поэтому углубление гидрологических исследований в данных направлениях позволит успешно решать задачи по оценке и прогнозу функционирования экосистемы Белого моря, рациональному управлению природопользованием, что представляет собой актуальную задачу нашего времени.

### ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БЕЛОМОРСКОГО РЕГИОНА

Положение акватории Белого моря на севере умеренного пояса и частично за полярным кругом, внутриконтинентальное положение обуславливают как морские, так и континентальные черты в климате моря. Это определяет значительную внутригодовую изменчивость направления ветров, соответствующих течений, уровенного режима и водообмена с Баренцевым морем. В зимний период над северной частью европейской территории России устанавливается обширный антициклон, а над Баренцевым морем развита интенсивная циклоническая деятельность. При

значительных вторжениях относительно теплого воздуха с Атлантики наблюдаются юго-западные ветры. Смещение в район Белого моря антициклона из Арктики вызывает северо-восточные ветры. Летом над Баренцевым морем обычно устанавливается антициклон, а к югу и юго-востоку от Белого моря развивается интенсивная циклоническая деятельность. Эти важные климатические особенности способны существенно влиять на гидрологические условия моря. Пресные воды, поступающие в Белое море в значительном количестве (в среднем  $215 \text{ км}^3/\text{год}$ ) за счет стока рек Северная Двина, Онега и Мезень, повышают уровень воды в нем, вследствие этого избыток воды стекает через Горло в Баренцево море, чему способствует преобладание зимой юго-западных ветров [1, 2]. Вследствие разности плотностей вод Белого и Баренцева морей возникает течение из Баренцева моря. Из Белого моря ежегодно вытекает примерно  $2200 \text{ км}^3$  воды, а втекает в него около  $2000 \text{ км}^3/\text{год}$ . Следовательно, за год возобновляется значительно более  $2/3$  всей массы глубинной (ниже 50 м) беломорской воды [7, 8].

Горизонтальная циркуляция вод Белого моря складывается под совокупным воздействием ветра, речного стока, приливов, компенсационных потоков, поэтому она разнообразна и сложна в деталях. Результирующее движение образует направленное против часовой стрелки перемещение вод, свойственное морям Северного полушария. На рис. 1 показаны направления основных поверхностных течений Белого моря [8], а условным знаком обозначены посты многолетних наблюдений за уровнем моря, данные по которым анализируются в настоящей работе. Вследствие сосредоточения речного стока главным образом в вершинах заливов создаются предпосылки для формирования здесь сточного течения, направленного в открытую часть Бассейна. Под влиянием силы Кориолиса движущиеся воды прижимаются к правому берегу и из Двинского залива направляются в Горло. У Кольского берега проходит течение из Горла в Кандалакшский залив, из которого воды движутся вдоль Карельского берега в Онежский залив и вытекают из него у его правого берега. На границе заливов и Бассейна создаются слабые циклонические круговороты, возникающие между движущимися в противоположных направлениях водами. Эти круговороты вызывают антициклональное движение вод между ними [1, 2].

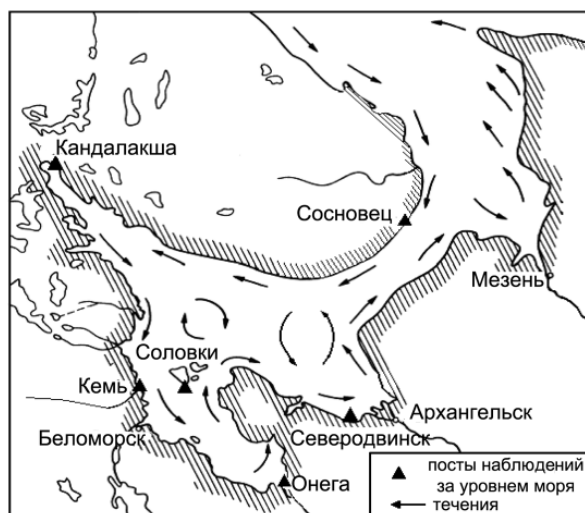


Рис. 1. Направления основных поверхностных течений Белого моря и расположение постов наблюдений за уровнем моря

## ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ

В работе использованы данные из достоверных источников: монографий изданных крупными научными учреждениями РФ, статей в ведущих научных периодических научных изданиях, баз открытого доступа Государственного водного кадастра. Данные о многолетней изменчивости средних годовых значений уровенной поверхности Белого моря на различных постах наблюдений с 1925 по 1998 г. приведены в монографиях А.И.Бабкова [1], Н.Н.Филатова, А.Ю.Тержевика [15], коллективной монографии [2], статей [5, 9, 10]. Данные о многолетней динамике значений различных вариантов индексов Северо-Атлантического колебания содержатся в монографии [12], сведения о многолетней изменчивости различных форм циркуляции атмосферы по Вангенгейму–Гирсу – в статье [13]. Данные о многолетней динамике рек, впадающих в Белое море, за период с 1925 по 2005 г. приведены в монографиях [2, 15], за период с 1978 по 1992 г. – в материалах Государственного водного кадастра [4].

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НА ДИНАМИКУ УРОВЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ БЕЛОГО МОРЯ ПАРАМЕТРОВ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ НАД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКОЙ

Климат Северной Атлантики и прилегающей к ней части Северного Ледовитого океана, как известно, в значительной мере зависит от атмосферной циркуляции над этим районом, которая представлена системами низкого и высокого давления. Указанные системы называют центрами действия атмосферы, которые формируют также соответствующие вихревые структуры в океане [14]. Интенсивность переносов в атмосфере и в океане подвержена значительным колебаниям во времени вследствие того, что параметры центров действия, т.е. их положение в пространстве и интенсивность, изменяются во времени весьма заметно [11, 12]. За меру интенсивности переносов принимают разность атмосферного давления на станциях, расположенных около климатических центров действия. Эту разность давления, определяемую, как правило, в среднем за зимние месяцы, называют Северо-Атлантическим колебанием (North Atlantic Oscillation – NAO). Индекс атмосферной циркуляции NAO широко используется в мировой практике изучения колебаний климата и их причин. Во «Всемирной программе исследований климата» существует подпрограмма «Изучение изменчивости и предсказуемости климата» (Climate Variability and Predictability – CLIVAR). Среди пяти главных направлений программы CLIVAR одним из ведущих является изучение Северо-Атлантического колебания, которое способно во многом определять особенности динамики климатических и гидрологических характеристик. Существуют различные варианты индекса NAO. Наиболее часто используется разность давления между Азорскими островами (Понта-Делгада) и Исландией (Акурейри), осредненная за три зимних месяца (декабрь–февраль), – индекс  $NAO_1$ . Представляют его непосредственно в единицах давления (гПа) или в виде отклонения от среднего в долях дисперсии [12]. Несколько реже используют разности давления между пунктами Лиссабон (Португалия) и Стиккисхоульмур (Исландия), осредненные за четыре зимних месяца (декабрь–март), –  $NAO_2$ . Кроме того, для характеристики Северо-Атлантического колебания применяют непосредственную разность давлений между центрами действия атмосферы –  $NAO_3$ , а также разности давления на меридиане, между точками с координатами  $45^\circ$  с.ш.,  $30^\circ$  з.д. и  $60^\circ$  с.ш.,  $30^\circ$  з.д., осредненные за три зимних месяца (декабрь–февраль), –  $NAO_4$ . Подробно все эти индексы были проанализированы в работе [12]. Было показано, что предпочтительным индексом NAO является индекс, который представляет собой первую главную компоненту разложения на естественные ортогональные функции всех четырех указанных выше индексов. Он наилучшим образом отражает колебания поля давления над Север-

Таблица 1

**Коэффициенты корреляции ( $r$ ) между индексами Северо-Атлантического колебания и динамикой уровня Белого моря**

Уровень моря, посты	Климатические индексы				
	NAO <sub>1</sub>	NAO <sub>2</sub>	NAO <sub>3</sub>	NAO <sub>4</sub>	NAO <sub>об.</sub>
Соловки	0,32*	0,401**	0,405**	0,22	0,43**
Сосновец	0,18	0,21	0,23	0,15	0,28*
Кемь-Порт	0,05	0,06	0,07	0,04	0,081
Онега-Порт	0,26	-0,28	-0,31*	-0,24	-0,33*
Кандалакша	0,17	0,204	0,21	0,15	0,22
Северодвинск	0,36*	0,404**	0,42**	0,283*	0,45**

\* Соответствует 95 %-ному уровню обеспеченности, \*\* – 99 %-ному.

ной Атлантикой, динамику параметров центров действия атмосферы и переносы воздушных масс. Этот индекс обозначен авторами как NAO<sub>об.</sub>. Данный индекс показал высокую эффективность при анализе взаимосвязей между климатическими и гидрологическими процессами в регионе Балтийского моря [6] и в Северной Атлантике в целом [12].

Для гидрологических исследований представляет также значительный интерес типизация атмосферных процессов, предложенная Г.Я.Вангенгеймом для северной части Восточного полушария и в последующем усовершенствованная им совместно с А.А.Гирсом для Западного полушария [2, 13]. Разработанная типизация макро-синоптических процессов основана на понятии элементарного синоптического процесса, в течение которого в данном районе сохраняются основные направления воздушных течений и, следовательно, знак барического поля. Все виды атмосферных процессов для Восточного полушария были подразделены на три формы атмосферной циркуляции: западная (*W*), восточная (*E*) и меридиональная (*C*).

В табл. 1 и 2 представлены результаты корреляционного анализа степени и характера связи между многолетней динамикой различных вариантов Северо-Атлантического колебания, форм циркуляции атмосферы Вангенгейма–Гирса и изменчивостью уровневной поверхности в различных районах Белого моря.

Как видно из табл. 1, наиболее значительная теснота связи положительного характера между динамикой уровня моря и Северо-Атлантическим колебанием наблюдается на станции, расположенной на Соловецких островах. При этом максимальные значения коэффициентов корреляции получены с индексами NAO<sub>об.</sub> и NAO<sub>3</sub>. В районе Горла Белого моря (Сосновец) также имеется значимая связь

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции ( $r$ ) между значениями повторяемости форм атмосферной циркуляции Вангенгейма-Гирса и динамикой уровня Белого моря**

Уровень моря, посты	Формы циркуляции			Уровень моря, посты	Формы циркуляции		
	W	E	C		W	E	C
Соловки	0,601**	-0,44**	0,17	Кандалакша	0,58**	-0,62**	0,21
Сосновец	0,62**	-0,56**	0,48**	Северодвинск	0,65**	-0,25	0,23
Кемь-Порт	0,57**	-0,54**	0,27	Онега-Порт	-0,16	-0,18	0,42**

\* Соответствует 95 %-ному уровню обеспеченности, \*\* – 99 %-ному.

между многолетними колебаниями уровня моря и  $NAO_{об.}$ , но теснота этой связи значительно меньше. По-видимому, это может быть объяснено тем, что в периоды усиления циклонической активности над Северной Атлантикой над Белым морем доминируют ветры западных направлений, усиливается течение вдоль южного берега Кандалакшского залива и, вследствие этого, возрастает уровень в юго-западной центральной части моря. Возрастание уровня в районе пункта Сосновец в северной части моря на фоне роста  $NAO$ , очевидно, вызывается усилением Северо-Атлантического течения и некоторым ростом поступления водных масс из Баренцева моря в Белое. Установлено, что в периоды возрастания интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой, выражаемой в виде индексов  $NAO$ , происходит некоторое снижение уровня моря в районе устья р. Онеги. Это может объясняться тем, что уровенная поверхность в данном районе зависит, прежде всего, от динамики речного стока. Корреляционный анализ показал, что возрастание значений индекса  $NAO_{об.}$  приводит к некоторому снижению объема стока р. Онеги ( $r = -0,33$  при уровне обеспеченности  $P = 99 \%$ ). Это может объясняться тем, что в периоды значительного увеличения интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой перенос относительно теплых и влажных воздушных масс в процессе циклонической активности осуществляется через Норвежское море, Кольский полуостров и далее в район Карского моря. Бассейн р. Онеги расположен существенно южнее той траектории движения, которую имеют циклоны при возросших градиентах давления в центре действия атмосферы Северной Атлантики. Поэтому величины атмосферных осадков и сток данной реки, а вслед за этим и уровень Белого моря в устьевой зоне несколько снижаются. В случае же ослабления градиентов давления между Азорским максимумом и Исландским минимумом траектории циклонов начинают проходить южнее [11, 12], имеют юго-восточное направление, и это способствует увеличению стока р. Онеги, а также стока других рек, впадающих в Белое море с юга. Связь между стоком Северной Двины и  $NAO_{об.}$  имеет положительный характер ( $r = 0,35$  и  $r = 0,26$  при  $P = 99 \%$ ). Динамика стока р. Мезень, впадающей в море с северо-восточного побережья, также демонстрирует значимую положительную связь с Северо-Атлантическим колебанием, но теснота связи ниже ( $r = 0,26$  при  $P = 95 \%$ ). Графически выявленные связи между интенсивностью циркуляции атмосферы и изменчивостью уровенной поверхности Белого моря представлены на рис. 2.

Из данных табл. 2 видно, что между многолетней динамикой уровенной поверхности Белого моря на выбранных постах и  $W$ - и  $E$ -формами атмосферной циркуляции по Вангенгейму–Гирсу отмечается достаточно тесная связь. Наибольшая теснота связи положительного характера наблюдается между западной  $W$ -формой циркуляции и динамикой уровня на станциях Северодвинск, Соловки, Сосновец. Восточная  $E$ -форма циркуляции демонстрирует обратный характер связи с колебаниями морской уровенной поверхности. Меридиональная  $S$ -форма циркуляции имеет статистически значимый положительный характер связи с только с уровнем на постах Онега и Сосновец. Графическая иллюстрация степени и характера связи между формами циркуляции атмосферы по Вангенгейму–Гирсу и уровенным режимом Белого моря представлена на рис. 3.

Установленная наиболее тесная зависимость между параметрами атмосферной циркуляции и динамикой уровня Белого моря в одном из крупнейших промышленных центров региона – Северодвинске позволяет построить модель изменчивости уровенной поверхности в виде уравнения регрессии. При этом представляется целесообразным использовать в качестве главных предикторов Северо-Атлантическое колебание ( $NAO_{об.}$ ) и  $W$ -форму Вангенгейма. Такой подход позволит наиболее полно учесть специфику влияния на динамику уровня крупномасштабных атмосферных циркуляционных процессов как над Северной Атлантикой, так и над Арктическим регионом.

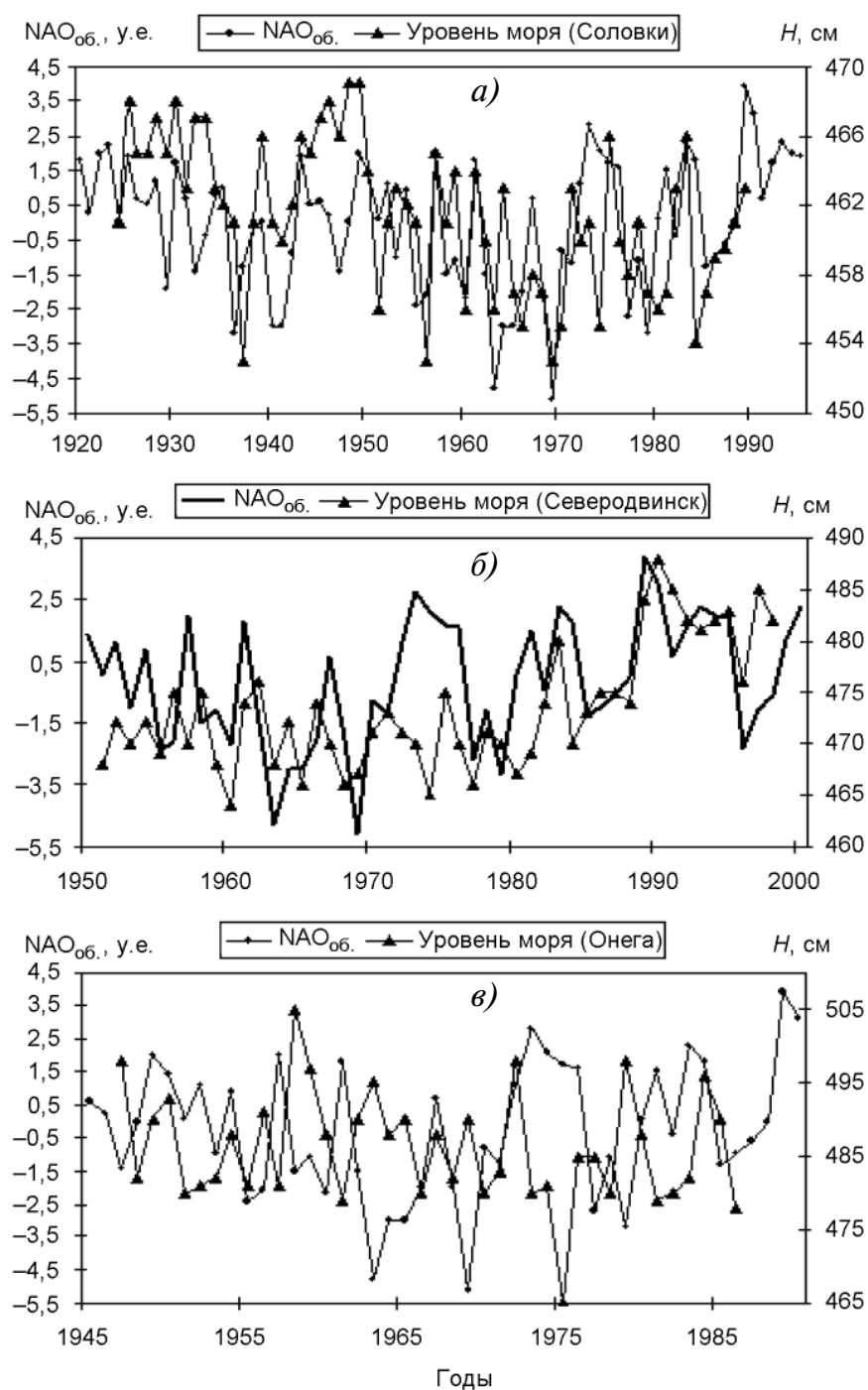


Рис. 2. Сравнение многолетней динамики обобщенного индекса Северо-Атлантического колебания с изменчивостью уровня моря на станциях Соловки (а), Сосновец (б), Онега (в)

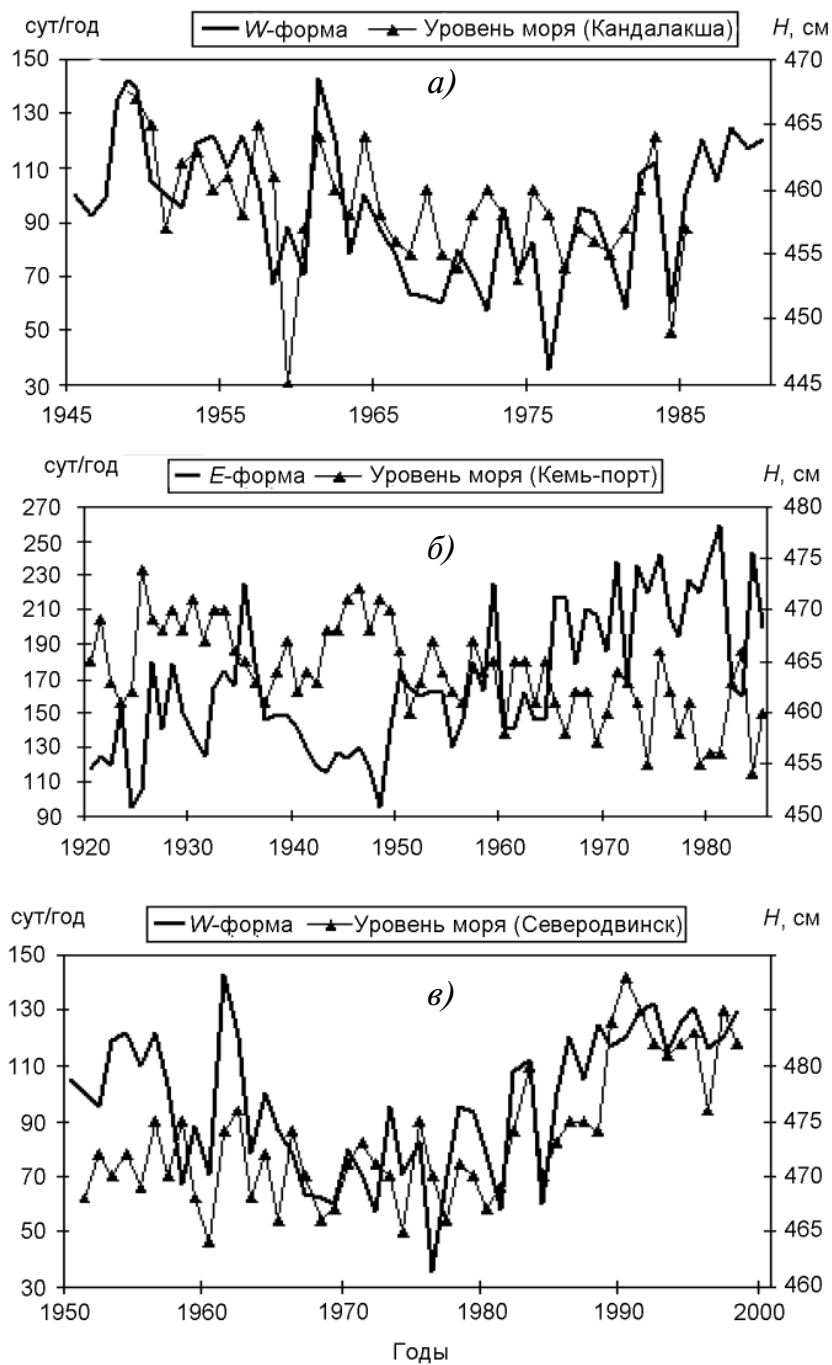


Рис. 3. Сравнение многолетней динамики повторяемости  $W$ -,  $E$ - и  $C$ -форм атмосферной циркуляции Вангенгейма–Гирса с изменчивостью уровня Белого моря в пунктах Канда-лакша (а), Кемь-Порт (б), Северодвинск (в)

Уравнение множественной регрессии для средних годовых значений уровня моря ( $H$ , см) в Северодвинске имеет следующий вид:

$$\Delta H = 461,403 + 1,046\text{NAO}_{\text{об.}} + 0,125 W\text{-форма}, \quad (1)$$

где  $\text{NAO}_{\text{об.}}$  – обобщенный индекс Северо-Атлантического колебания (у.е.),  $W$ -форма – западная форма атмосферной циркуляции согласно типизации атмосферных процессов Г.Я.Вангенгейма и А.А.Гирса (сут/год).

Коэффициент корреляции между наблюдаемыми и рассчитанными по составленному уравнению регрессии значениями уровня моря составляет  $r = 0,72$  при  $P = 99,9 \%$ . Средняя разность между наблюдаемыми и рассчитанными значениями составляет  $2 \%$ , что позволяет использовать данное уравнение в качестве эффективной прогностической модели.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ многолетней динамики уровня Белого моря в различных районах показал наличие достаточно тесных связей с крупномасштабными параметрами циркуляции атмосферы над Северной Атлантикой и северной частью Восточного полушария. В условиях Белого моря следует признать несколько более эффективными индикаторами динамики уровенной поверхности  $W$ - и  $E$ -формы циркуляции атмосферы Вангенгейма, в то время как индексы Северо-Атлантического колебания на всех проанализированных постах обладают меньшей теснотой связи с изменчивостью уровня моря. Существенное повышение уровня в Горле Белого моря за счет увеличения объема поступления баренцевоморских вод возможно ожидать при развитии  $W$ -формы циркуляции. В устьевых зонах рек Онеги и Сев. Двины уровенная поверхность находится под значительным влиянием речного стока, величина которого в свою очередь зависит от параметров атмосферной циркуляции. Многолетняя динамика уровня моря в Северодвинске демонстрирует наиболее высокую среди других анализируемых постов наблюдений зависимость от интенсивности  $\text{NAO}$  и повторяемости  $W$ -формы атмосферной циркуляции. Таким образом, на уровенный режим Белого моря оказывают значительное влияние процессы циркуляции атмосферы как над Арктическим регионом, так и над Северной Атлантикой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабков А.И. Гидрология Белого моря. СПб.: ЗИН РАН, 1998. 95 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 240 с.
3. Гирс А.А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 280 с.
4. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные по режиму и ресурсам поверхностных вод. Ч. 1. Реки и каналы. Архангельск, 1978–1992. Т. 0. Вып. 0–9.
5. Гордеева С.М., Малинин В.Н. О пространственно-временной классификации колебаний уровня Белого моря // Колебания уровня в морях: Сб. науч. тр. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2003. С. 21–30.
6. Дроздов В.В., Смирнов Н.П. Колебания климата и донные рыбы Балтийского моря. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2009. 249 с.
7. Елисов В.В. Оценка водного, термического и солевого балансов Белого моря // Метеорология и гидрология. 1997. № 9. С. 83–93.
8. Залогин Б.С., Косарев А.Н. Моря. М.: Мысль, 1999. С. 39–45.
9. Инжебейкин Ю.И. Колебания уровня Белого моря. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 152 с.
10. Инжебейкин Ю.И. Особенности длиннопериодных колебаний уровня Белого моря // Колебания уровня в морях: Сб. науч. тр. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2003. С. 47–56.



11. Мартынова Т.В. О колебаниях положения и интенсивности центров действия атмосферы // Метеорология и гидрология. 1990. № 4. С. 50–55.
12. Смирнов Н.П., Воробьев В.Н., Кочанов С.Ю. Северо-Атлантическое колебание и климат. СПб.: Изд-во РГГМУ, 1998. 122 с.
13. Смирнова А.И., Терзиев Ф.С., Арсенчук М.О., Яковлева Н.П. Общие закономерности изменчивости гидрометеорологического режима Балтийского и Белого морей // Метеорология и гидрология. 2000. № 11. С. 62–72.
14. Трешников А.Ф. Центры действия атмосферы и гидросферы // Проблемы Арктики и Антарктики. 1974. Вып. 43–44. С. 153–170.
15. Филатов Н.Н., Терзевик А.Ю. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и природных факторов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 349 с.

V.V.DROZDOV

### INFLUENCE OF LARGE-SCALE PARAMETERS OF CIRCULATION OF ATMOSPHERE ON LEVELS A MODE OF THE WHITE SEA

*Regional features of water masses circulation and sea level dynamics of the White Sea are considered. The character and depth complexity between different variants of the North Atlantic Oscillation (NAO) index, forms of the atmosphere's circulation (typification according to Vangengeim and Girs), long-term dynamics of the White Sea sea level are analyzed. Close relationship between the indexes of atmosphere's activity, direction of circulation and variability of the sea level of the different areas of the White Sea are established.*

*Keywords:* White Sea, atmosphere's circulation, sea level, North Atlantic Oscillation (NAO) index.