

*С.М. Гордеева, А.А. Соколов*

## **КЛИМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОДНОГО БАЛАНСА НОРВЕЖСКОГО МОРЯ**

*S.M. Gordeeva, A.A. Sokolov*

## **THE CLIMATOLOGICAL ESTIMATE OF WATER BALANCE OF THE NORWEGIAN SEA**

*Рассматриваются средние оценки интегральных по площади потоков воды на горизонтальных и вертикальных границах бассейна Норвежского моря до глубины 579 м за период 1980–2008 гг. Показано, что Северо-Атлантическое течение поступает в бассейн Норвежского моря преимущественно через южную и западную открытые границы, а уходит через восточную и северную границы. Отмечается недостаток воды, который отражается в пониженном относительно Мирового океана уровне поверхности моря. Невязка водного баланса мала и составляет 1,5 %, что отражает хорошее качество модели реанализа CARTON-GIESE SODA, из которой взяты исходные данные, и показывает адекватность этой базы данных на региональном уровне.*

*Ключевые слова: водный баланс, Норвежское море, Северо-Атлантическое течение, потоки массы, CARTON-GIESE SODA Reanalysis.*

*The averaged area integrated water flux estimates on horizontal and vertical boundaries of the Norwegian Sea basin limited by 579 m depth for the period 1980–2008 are considered. It was found that the North Atlantic Current flows into the basin mainly through the southern and western open boundaries and goes out through the eastern and northern boundaries. Water deficiency was noticed in the mass balance of the basin, which is reflected in reduced level of the sea surface compared to the World Ocean. The water balance residual is small and amounts to 1,5 %, which reflects decent quality of the CARTON-GIESE SODA reanalysis model, which was used as an original data source, and proves the database adequacy at the regional scale.*

*Key words: water balance, Norwegian Sea, North-Atlantic current, mass fluxes, CARTON-GIESE SODA Reanalysis.*

### ***Введение***

Норвежское море — один из наиболее интересных в динамическом отношении районов Мирового океана. Это, прежде всего, связано с транзитом через него Северо-Атлантического течения, которое является ключевым звеном механизма формирования климата в Северной Атлантике и Европе [1]. Кроме того, изменчивость характеристик поверхности моря, связанная с динамикой Северо-Атлантического течения, оказывает непосредственное влияние на изменение количества испарившейся влаги в атмосферу, которая в дальнейшем под действием западных ветров с циклонами переносится на Европейскую часть России и формирует погоду в этом регионе [6]. Поэтому

оценка водного баланса Норвежского моря, который здесь в основном определяется адвекцией массы через бассейн, несомненно, является интересной задачей.

Уравнение водного баланса Норвежского моря с открытыми внешними границами можно представить в следующем виде [3]:

$$\Delta V = U + W + E_{\text{эф}}, \quad (1)$$

где  $\Delta V$  — изменение объема моря за конкретный период времени;  $U$  — горизонтальные потоки массы по периметру бассейна;  $W$  — вертикальный поток массы через нижнюю границу;  $E_{\text{эф}}$  — эффективное испарение с поверхности, равное разности испарения  $E$  и осадков  $P$ .

Водный баланс кроме объемной характеристики можно выразить через приращение слоя воды (уровня)  $\Delta H$  на поверхности моря, так как

$$\Delta V = \Delta H \cdot S, \quad (2)$$

где  $S$  — площадь поверхности бассейна.

Цель данной работы состоит в оценке этих составляющих водного баланса в среднем за период с 1980 по 2008 г.

### ***Район и материалы исследования***

Район исследования в Норвежском море представляет собой трапецию в крайних географических координатах  $60\text{--}70^\circ$  с.ш. и  $5^\circ$  в.д. —  $15^\circ$  з.д. Площадь района составляет  $1,06 \times 10^6$  км<sup>2</sup>, периметр — 3628 км.

Исходные данные взяты из базы данных CARTON-GIESE Simple Ocean Data Assimilation (SODA) Reanalysis Международного Исследовательского Института Климата и Общества Колумбийского университета города Нью-Йорк (США) (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/>). Основной массив среднемесячных данных о температуре и солености базы данных SODA состоит примерно из  $7 \times 10^6$  глубоководных профилей, две трети из которых были получены из Атласа Мирового океана 2001 с обновлением до декабря 2004 г. Этот массив данных был расширен с помощью наблюдений оперативных профилей температуры архива the National Oceanographic Data Center/NOAA, в том числе наблюдений из TAO/Triton и ARGO-дрифтеров, а также дополнен альтиметрическими наблюдениями за уровнем моря. Также в базе данных SODA Reanalysis представлены значения скоростей течений на отдельных горизонтах во всей толще воды, рассчитанные по модели на основе глубоководных наблюдений [14]. Из базы выбирались горизонтальные скорости течения на 4-х разрезах по периметру района: северный — по параллели  $70^\circ$  с.ш., южный — по параллели  $60^\circ$  с.ш., западный — по меридиану  $15^\circ$  з.д. и восточный — по меридиану  $5^\circ$  в.д.

После исследования вертикального распределения горизонтальных составляющих скоростей течений на разрезах оказалось, что интенсивные потоки воды располагаются

в приповерхностном слое и на глубине ниже 500 м их скорость практически везде не превышает 4 см/с. Это соответствует и наблюдениям других авторов [9, 21]. Поэтому за нижнюю границу динамического слоя был принят горизонт 579 м (1900 футов), ближайший, на котором представлены данные архива SODA. Значения горизонтальных составляющих скоростей течений на разрезах были выбраны на 20 горизонтах от поверхности до этой глубины. Кроме того, по площади района в пространственной сетке через  $0,5^\circ$  выбирались вертикальные скорости течений на нижнем горизонте (579 м), а также значения уровня поверхности моря по альтиметрическим наблюдениям.

Для замыкания уравнения водного баланса использовались компоненты пресного баланса: осадки ( $P$ ) и испарение ( $E$ ), выбранные из архива реанализа CDAS (Climate Data Assimilation System), который является частью глобальной базы гидрометеорологических данных NOAA NCEP/NCAR Reanalysis-1 (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/>) [20]. Этот архив содержит разнообразные среднемесячные данные с 1949 г. в узлах широтно-долготной сетки  $1,875 \times 1,905^\circ$  и оперативно пополняется с очень небольшим запаздыванием во времени. По разности испарения и осадков рассчитывалось эффективное испарение  $E_{\text{эф}}$ .

Все данные, с 1980 по 2008 г. были усреднены за этот период ( $n = 29$  лет) и рассматриваются как климатические. Следует отметить, что при таком усреднении не учитываются макротурбулентные потоки воды, вклад которых в данном районе не может быть малым, учитывая присутствие такого интенсивного течения, как Северо-Атлантическое.

По значениям скоростей течений были рассчитаны с учетом площадей интегральные потоки через нижнюю и боковые поверхности объема бассейна. Все компоненты водного баланса выражались как в объемных единицах (Свердрупах,  $1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$ , или  $\text{км}^3/\text{мес}$ ), так и в величинах слоя воды, отнесенной к площади поверхности акватории ( $\text{мм}/\text{с}$  или  $\text{м}/\text{мес}$ ).

### *Обсуждение результатов*

Внимание к водообмену Норвежского моря с Северной Атлантикой обычно направлено на естественные границы моря: Фареро-Исландский порог и Фареро-Шетландский канал. Учитывая, что через Фареро-Шетландский канал проходит вековой океанографический разрез, 100-летие которого отмечалось в 1993 г. [11], этот район очень хорошо обеспечен информацией о потоках воды через эту границу. Оценки величины этих потоков рассматриваются в многочисленных научных исследованиях, например [2, 8, 10, 17, 19, 21, 22, 25], некоторые из них приведены в табл. 1. Нужно отметить, что в последние годы измерения производятся на новой приборной базе: измерителями ADCP [13, 18], глайдерами [12], а также на основе альтиметрических данных [16, 17].

Как отмечено в [22] и видно из табл. 1, оценки суммарного переноса через южную границу моря разных исследователей достаточно сильно различаются, от 2 до 8 Св. Это, прежде всего, объясняется различной приборной базой и различными периодами времени исследований. Однако можно отметить, что в последние годы величина потоков оценивается несколько большей, чем ранее, что может быть связано с улучшением качества наблюдений.

Таблица 1

## Оценки потоков воды на границах Норвежского моря

Границы бассейна	Величина потока, Св
Южная (данная работа)	5,0
Северная (данная работа)	4,3
Западная (данная работа)	3,2
Восточная (данная работа)	4,8
Фареро-Исландский порог [25]	2,3
Фареро-Шетландский канал (1988–1989) [23]	1,2–1,6
Фареро-Шетландский пролив (модель ИВМ РАН на основе климатических данных) [8]	1,5±2,3
Фареро-Шетландский пролив (1994–2005) [18]	3,3±4,0
Фареро-Шетландский пролив (1998–2008) [13]	3,0±2,0
Фареро-Шетландский пролив (1995–2007) [15]	1,7±0,2
Фареро-Исландский порог [24]	3,8
Фареро-Шетландский канал [24]	3,8
Фареро-Исландский порог (1993–2011) [19]	3,5
Фареро-Шетландский канал (1993–2011) [19]	4,1

Полученное в данной работе распределение интегральных потоков воды через боковые границы бассейна представлены на рис. 1 и в табл. 1. Как видно из рис. 1, в среднем за период с 1980 по 2008 г. в исследуемом районе потоки водных масс через боковые границы бассейна представляют собой струи разного направления. О существовании струй в этом районе неоднократно упоминалось разными исследователями [2, 9]. Преобладающим горизонтальным потоком здесь является Северо-Атлантическое течение, воды которого устремляются к северу практически вдоль всей южной границы, а также через западную границу — между Исландией и Фарерскими о-вами.

Из рис. 1 видно, что преобладающими потоками через восточную границу является две струи восточного направления, которые в центральной части разреза достигают величины 2 Св, а в северной части разреза отмечается поток западного направления до 1,5 Св. В целом вынос воды через восточную границу составляет 4,8 Св. Существование двух струй отражает известный факт, что Норвежское течение разделяется над Норвежским плато (примерно на 66–67° с.ш. и 3° в.д.) на две ветви [4]. Поток, проходящий через западную границу, имеет две ярко выраженные струи с противоположными направлениями на широтах 61–64° с.ш., одна из которых направлена на восток с величиной 1,6 Св, а вторая — на запад (1,3 Св) и связана с Восточно-Исландским течением. Суммарный внос через западную границу составляет 3,5 Св. На северной границе района выходящий поток атлантической воды относительно невелик и наиболее выражен в её восточной части (до 0,7 Св). Южная граница является основной зоной, через которую Северо-Атлантическое течение поступает в Норвежское море. Практически по всей её протяженности потоки имеют северное направление и отдельные струи, расположенные напротив основных проходов (Фареро-Шетландского и Фареро-Исландского), достигают 1,1 Св. Несмотря на небольшую скорость отдельных

струй, общий перенос через южную границу составляет 5 Св и является максимальным потоком, входящим в водоем.

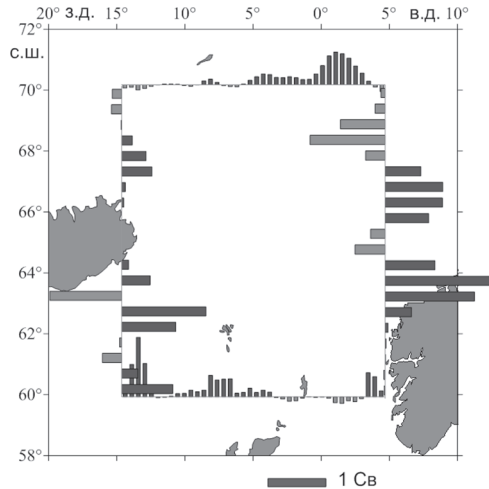


Рис. 1. Распределение интегрированных по вертикали (от 0 до 579 м глубины) в каждой точке сетки горизонтальных потоков воды через боковые границы бассейна

Как видно из табл. 1, оценки интегральных потоков воды через границы бассейна за период с 1981 по 2008 г. в целом соответствуют результатам, полученным ранее другими исследователями, суммарный поток через южную и южную часть западной границы, соответствующий суммарному потоку через Фареро-Исландский порог и Фареро-Шетландский канал, составляет 7,6 Св.

Вертикальные скорости в Норвежском море на горизонте 576 м имеют максимальные значения вдоль Фареро-Исландского порога с максимумом 0,016 см/с (рис. 2). Направление вертикальных перемещений вдоль порога определяется направлениями соответствующих струй основных течений: в восточной части порога вертикальный поток направленный вверх, сменяется потоком вниз, так как он определяется Северо-Атлантическом течением, идущим с юга, а в западной части порога так же ведет себя Восточно-Исландское течение, идущее с севера. В целом по бассейну вертикальные скорости на нижней границе имеют разные направления, невелики и не превышают 0,002 см/с. Это свидетельствует о том, что основные динамические процессы, происходящие в исследуемом бассейне, сосредоточены в вышележащих слоях. Однако, учитывая большую площадь района, интегральный поток через нижнюю границу может быть значительным.

Уровень поверхности исследуемого бассейна Норвежского моря (рис. 3) в целом ниже среднего уровня Мирового океана и отражает рельеф дна района. Высокий уровень поверхности отмечается в южной и, особенно, в юго-восточной части района, там, где находится шельфовая зона, а низкий уровень — в зоне Лафотенской котловины. Подобное распределение уровня, скорее всего, определяется стерическими эффектами [19], а понижение уровня в северо-западной части бассейна отражает наличие

там квазистационарного антициклонического круговорота, вызывающего опускание воды в своем центре (конвекцию) [5].

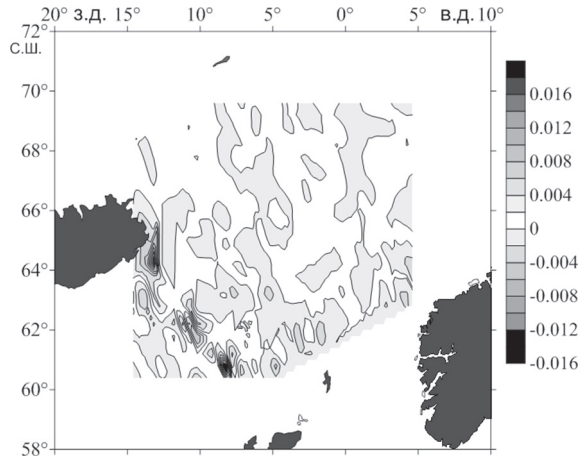


Рис. 2. Вертикальные скорости (см/с) на горизонте 576 м, средние за период 1980–2008 гг. (положительные значения указывают направление вверх)

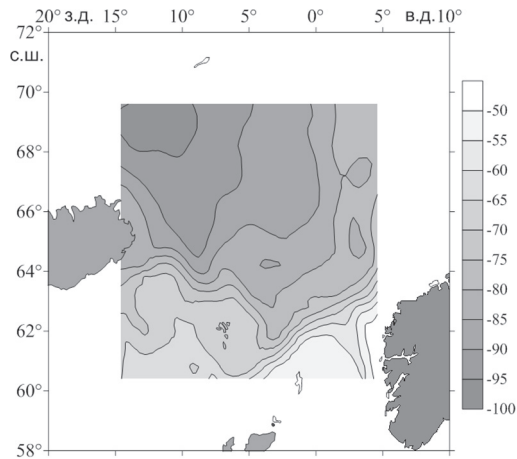


Рис. 3. Уровень поверхности Норвежского моря (см), средний за период 1980–2008 гг.

В Норвежском море наблюдается выраженная дипольная структура пространственной изменчивости эффективного испарения (рис. 4): вдоль восточной границы бассейна, от Фареро-Шетландского канала до северо-восточной части бассейна, испарение преобладает над осадками с максимумом 69 мм/мес. Это связано с

непосредственным прохождением там тёплых вод Северо-Атлантического течения и формирует, собственно, очаг Норвежской энергоактивной зоны.

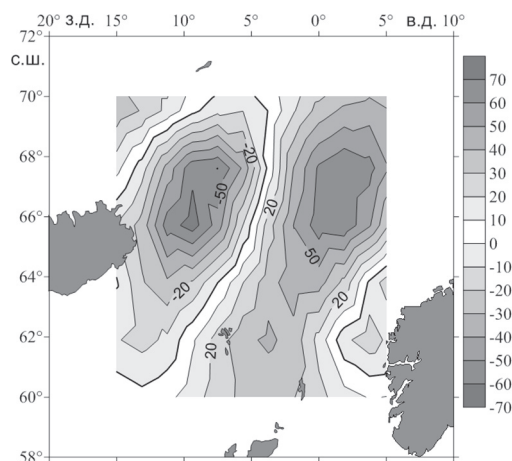


Рис. 4. Эффективное испарение с поверхности Норвежского моря (мм/мес), среднее за период 1980–2008 гг.

На западе и северо-западе наоборот, осадки преобладают над испарением с максимумом 65 мм/мес. В связи с присутствием в районе исследования двух очагов противоположного действия примерно одинаковой интенсивности интегральное по площади эффективное испарение с поверхности моря очень невелико и показывает преобладание испарения над осадками со средней величиной 12 мм/мес. Эта величина, несомненно, сравнима с невязкой определения компонентов эффективного испарения и определяется, прежде всего, выбором района исследования. Этим также объясняется и отличие от результатов других авторов, указывающих, что в Норвежском море осадки преобладают над испарением [6, 7]

Далее все компоненты водного баланса пересчитывались на величину слоя поверхности бассейна в соответствии с формулой (2), т.е. если за месяц в бассейн приносится несколько кубометров воды, то она может сформировать на поверхности слой конкретной толщины. Такие оценки для всех компонентов водного баланса Норвежского моря представлены в табл. 2 и на рис. 5. На рис. 5 также показана схема водного баланса района исследований. Из рис. 5 видно, что входящие потоки с южной стороны приносят в регион больше воды, чем с запада. Вынос воды происходит с восточной стороны больше, чем с северной. Таким образом формируется основная струя переноса — с южной границы на восточную.

Из табл. 2 видно, что в водном балансе бассейна Норвежского моря преобладают горизонтальные потоки: общий объем воды, входящий в регион, в пересчете на толщину слоя поверхности составил 21,89 м/мес, а выходящий — 22,31 м/мес. Они составляют 95 % и 102 % от объема входящей воды соответственно. Вертикальная скорость на нижней границе региона вносит в объем еще 5 % воды. Так как для оценки

интегрального эффективного испарения район исследования оказался нерепрезентативным, как указано выше, оно по сравнению с адвективными потоками несоизмеримо мало и составляет 0,05 %. При другом выборе района  $E_{эф}$  могло бы быть сравнимо с потоком воды на нижней границе.

Таблица 2

Составляющие водного баланса в бассейне Норвежского моря, средние за период 1980–2008 гг.

Характеристика	Величина слоя воды поверхности бассейна	
	м/мес	%
Входящий поток		
Через западную границу	8,57	39
Через южную границу	12,20	56
Через нижнюю границу	1,12	5
Сумма	21,89	<b>100</b>
Выходящий поток		
Через восточную границу	11,77	54
Через северную границу	10,53	48
Эффективное испарение	0,012	0,05
Сумма	22,31	102,05
Водный баланс		
Разность входящих и выходящих потоков	-0,42	-2,05
Уровень моря	-0,76	-3,5
Невязка	0,34	1,5

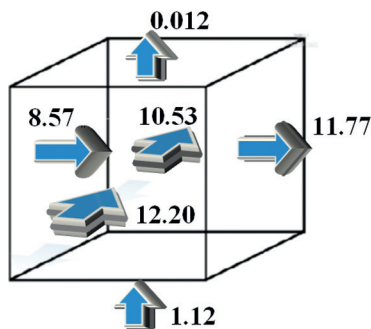


Рис. 5. Схема средних за 1980–2008 гг. потоков воды через границы в пересчете на толщину слоя на поверхности бассейна Норвежского моря, м/мес

В целом, в выбранный район воды приходит меньше, чем из него выходит. Разность составляет 2,05 %, так что можно ожидать, что недостаток воды отразится в уровне моря, который должен быть ниже в среднем на 42 см. Однако средний уровень



моря ниже ожидаемого еще на 34 см, что составляет невязку 1,5 %. Таким образом, в бассейне отмечается недостаток воды.

Таким образом, рассчитанные компоненты водного баланса исследуемого бассейна Норвежского моря практически полностью определяются качеством исходной модели реанализа CARTON-GIESE SODA (из которой взяты все исходные данные, кроме  $E_{эф}$ ), рассчитанная невязка в 1,5 % является достаточно малой, чтобы утверждать адекватность оценок динамической структуры этой базы данных на региональном уровне. Кроме того, невязка баланса также отражает сумму не учитываемых компонентов. В данном случае не учитывались, прежде всего, горизонтальные макротурбулентные потоки воды. Возможно, они имеют разные знаки, вследствие чего невязка мала.

### Выводы

При оценке компонентов водного баланса Норвежского моря, среднемноголетних для периода 1980–2008 гг., было выявлено, что вода Северо-Атлантического течения с преобладающим направлением переноса с юга на восток поступает в бассейн Норвежского моря преимущественно через южную и западную открытые границы, а также через нижнюю границу на глубине 576 м в объемном выражении 7,56 Св или 20,8 м/мес, а уходит через восточную и северную границы — 8,12 Св или 22,3 м/мес. Таким образом, в бассейне формируется недостаток воды, который отражается в пониженном относительно Мирового океана уровне поверхности моря.

Невязка водного баланса мала и составляет 1,5 %, что отражает хорошее качество модели реанализа CARTON-GIESE SODA, из которой взяты исходные данные, и показывает адекватность этой базы данных на региональном уровне.

### Литература

1. *Алексеев Г.В., Николаев Ю.В., Романцов В.А.* Норвежская энергоактивная зона океана. // Итоги науки и техники. Атмосфера, океан, космос — программа «Разрезы», 1985, т. 5, с. 45–62.
2. *Валерианова М.А., Новикова Е.М.* Об изменчивости гидрологических условий в южной части Норвежского моря. // Труды ЛГМИ, 1964, вып. 3, с. 3–11.
3. *Гордеева С.М., В.Н. Малинин.* О межгодовой изменчивости компонентов водного баланса Балтийского моря. // Современные проблемы гидрометеорологии. Сборник научных трудов. РГГМУ, 1999, вып. 123, с. 64–80.
4. *Залогин Б.С., Косарев А.Н.* Моря. Природа Мира. — М.: Мысль, 1999. — 402 с.
5. *Иванов В.В.* Структурообразующие гидрофизические процессы в приатлантической Арктике: Дис... докт. физ.-мат. наук. — М., 2012. — 243 с.
6. *Малинин В.Н.* Водный баланс атмосферы в Норвежской энергоактивной зоне. // Труды ЛГМИ, 1986, вып. 93, с. 99–113.
7. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). — Мурманск: изд-во ПИНРО, 2003. — 164 с.
8. *Мошонкин С.Н., Филюшкин Б.Н.* Влияние придонных гравитационных течений в проливах на водные массы Северной Атлантики. // Водные массы океанов и морей (к 100-летию А.Д. Добровольского). — М.: «МАКС пресс», 2007, с. 130–146
9. *Сентябов Е.В.* Межгодовые изменения океанографических условий в Норвежском море и их влияние на распределение пелагических рыб: Дис... канд. геогр. наук. — СПб., 2009. — 171 с.
10. Структура и изменчивость крупномасштабных океанологических процессов и полей в Норвежской энергоактивной зоне. Под ред. Г.В. Алексеев и др. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — 128 с.

11. *Tarrell U.P.* Изменения в оттоке вод из северных морей по результатам 100-летнего периода океанографических наблюдений в Фареро-Шетландском канале. // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море: Сб. докл. Междунар. симпозиума. — Мурманск: изд-во ПИНРО, 2005, с. 101–114.
12. *Beaird N.L., Rhines P.B., Eriksen C.C.* Overflow Waters at the Iceland–Faroe Ridge Observed in Multiyear Seaglider Surveys. // *J. Phys. Oceanogr.*, 2013, vol. 43, pp. 2334–2351.
13. *Berx B.* The hydrography and circulation of the Faroe-Shetland Channel: a century of research. // *Ocean Challenge*, 2012, vol. 19, pp. 15–19.
14. *Carton J.A., Giese B.S.* A Reanalysis of Ocean Climate Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). // *Mon. Wea. Rev.*, 2008, vol. 136, pp. 2999–3017. — DOI:10.1175/2007MWR1978.1.
15. *Friedrichs A., Quadfasel D., Jochumsen K., Nunes N.* An analysis of the velocities in the Faroe-Shetland Channel in VIKING20. // North Atlantic Climate Variability, 24–26 September 2012, IfM Hamburg, ZMAW.
16. *Hansen B., Hátún H., Larsen K.M.H., Kristiansen R., Mortensen E., Østerhus S.* Atlantic water flow between Iceland and Faroes 2012–2013. // Havstovan, Technical Report, Nr. 14–02. 2014. — Электронный ресурс: [<http://www.hav.fo/PDF/Ritgerdir/2014/TecRep1402.pdf>].
17. *Hatun H., McClimans T.A.* Monitoring the Faroe Current using altimetry and coastal sea-level data. // *Continental Shelf Research*, 2003, vol. 23, pp. 859–868.
18. *Hughes S.L., Turrell W.R., Hansen B., Østerhus S.* Fluxes of atlantic water (volume, heat and salt) in the Faroe-Shetland channel calculated from a decade of acoustic doppler current profiler data (1994–2005). // Fisheries Research Services collaborative report, no. 01/06, Marine Laboratory. — Aberdeen, 2006.
19. *Johannessen J.A., Raj R.P., Nilsen J.E.Ø., Pripp T., Knudsen P., Counillon F., Stammer D., Bertino L., Andersen O.B., Serra N., Koldunov N.* Toward Improved Estimation of the Dynamic Topography and Ocean Circulation in the High Latitude and Arctic Ocean: The Importance of GOCE. // *Surv. Geophys.*, 2014, vol. 35, pp. 661–679. — DOI:10.1007/s10712-013-9270-y.
20. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project. // *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, vol. 77, pp. 437–471.
21. *Mork K.A., Blindheim J.* Variations in the Atlantic inflow to the Nordic Seas, 1955–1996. // *Deep-Sea Research*, part I, 2000, vol. 47, pp. 1035–1057.
22. *Pistek P., Johnson D.R.* Transport of the Norwegian atlantic current as determined from satellite altimetry. // *Geoph. Res. Lett.*, 1992, vol. 19, no. 13, pp. 1379–1382.
23. *Schlichtholz P., Jankowski A.* Hydrological regime and water volume transport in the Faeroe-Shetland Channel in summer of 1988 and 1989. // *Oceanologica Acta*, 1993, vol. 16, no. 1, pp. 11–22.
24. *Seagliders In Faroese Waters: Project proposal.* 2005. — Электронный ресурс: [<http://www.hav.fo/PDF/hjalmar.pdf>].
25. *Tait J.B.* Hydrography of the Faroe Shetland Channel 1927–1952. // *Mar. Res. Scot.*, 1957, no. 2. — 309 p.