науки о земле

УДК 551.465.72

DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-2-50-59

ДЕФИЦИТ СОЛЕНОСТИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕЧНОГО СТОКА НА МОРСКУЮ СРЕДУ

© 2017 г. А.С. Булавина^{1, 2}, С.Л. Дженюк¹

Аннотация. Предложено использование дефицита солености прибрежной водной массы относительно прилегающих морских вод для оценок пресноводного баланса и водообмена. Этот показатель позволяет определить вклад речного стока в формирование водной массы и рассчитать скорость обновления вод, что является необходимым этапом оценок ассимиляционной емкости шельфовых морей. Получены такие оценки для изолированной водной массы (Азовское море) и заливов Белого и Баренцева морей со свободным водообменом, где опресненные водные массы ограничены халинными фронтами. С использованием базы океанографических данных по Баренцеву и Белому морям выполнены расчеты дефицита солености отдельных акваторий по отношению к водам океанического происхождения. Рассчитаны объемы прибрежных водных масс Белого и юго-востока Баренцева морей и вклад речного стока в их формирование. Прибрежные водные массы ранжированы по степени их проточности, что позволяет оценить степень уязвимости морских заливов по отношению к антропогенному загрязнению. Показано, что воды Кандалакшского залива отличаются высокой проточностью и, следовательно, не образуют изолированную водную массу. Результаты таких расчетов позволяют обосновать и скорректировать оценки качества морских вод с использованием индексов загрязнения. Получены оценки загрязняющего влияния речного стока на прибрежные водные массы. Наиболее уязвимой является водная масса Двинского залива.

Ключевые слова: водные массы, соленость, речной сток, пресноводный баланс, водообмен, загрязнение, Азовское море, Баренцево море, Белое море, база данных.

THE SALINITY DEFICIT AS AN INDICATOR OF THE IMPACT OF RIVER RUNOFF ON THE MARINE ENVIRONMENT

A.S. Bulavina^{1, 2}, S.L. Dzhenyuk¹

Abstract. It is proposed to use the deficit of the coastal water mass salinity in respect to adjoining sea waters for the estimations of fresh water balance and water exchange. This index permits to determine the river runoff input to the water mass formation and to calculate the rate of water renewal which is the necessary stage of estimations of the shelf seas assimilative capacity. Such estimations are obtained for the isolated water mass of the Azov Sea and the White and Barents Seas bays where the relatively isolated desalted water masses are limited by salinity fronts. Using the oceanographic database of the Barents and White Seas the calculations of salinity deficit are made for the separate water areas in relation to the waters of oceanic origin. Volumes of the coastal water masses of the White and Barents Seas and input of river runoff to their formation are calculated. The coastal water masses are ranged by the rate of their water renewal that permits to estimate the degree of sea bays vulnerability to the anthropogenic pollution. It is shown that the Kandalaksha Bay waters are distinguished by high rate of water exchange and so do not form the isolated water mass. The results of such calculations permit to substantiate and correct the estimations of sea water quality using pollution indices. The assessments of the river runoff pollutant impact on the coastal water masses are obtained. The water mass of the Dvina Bay is the most vulnerable.

Keywords: water masses, salinity, river runoff, fresh water balance, water exchange, pollution, Azov Sea, Barents Sea, White Sea, database.

¹ Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17, e-mail: bulavina@mmbi.info, dzhenyuk@mmbi.info

² Мурманский государственный арктический университет (Murmansk Arctic State University, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183038, г. Мурманск, ул. Капитана Егорова, 15

ВВЕДЕНИЕ

Значение речного стока для морской среды и экосистем хорошо известно. Его воздействие приводит к опреснению прибрежных вод, изменениям их термического и ледового режима, образованию геохимических барьеров, поступлению больших объемов загрязняющих веществ из речных бассейнов, возникновению специфических экологических ниш. Трансформация речных вод является одним из важнейших факторов, определяющих ассимиляционную емкость морских экосистем.

В формировании пресноводного баланса океанов и морей наряду с речным стоком участвуют осадки и испарение. Поскольку эти процессы всегда противоположны по знаку и, в отличие от речного стока, распределены по всей поверхности, часто рассматривают их совместный вклад как разность осадки - испарение. В зависимости от соотношения составляющих пресноводного баланса складываются принципиально разные условия формирования полей солености поверхностного слоя. В открытых частях океана и окраинных морях за пределами областей воздействия речного стока ее пространственно-временная изменчивость невелика. Так, в поверхностном слое Северо-Восточной Атлантики, Норвежского и западной части Баренцева морей она устойчиво близка к 35 ‰, причем ее вариации на 0,2-0,3 ‰ расцениваются как значительная аномалия. В изолированных бассейнах различия пресноводного баланса приводят к значительным отклонениям солености от океанической. В Средиземном море, где испарение резко преобладает над осадками, а речной сток ежегодно замещает менее 0,01 % объема вод, соленость поверхностного слоя составляет 38-39 ‰. В то же время в столь же изолированном Черном море, где объем стока по отношению к объему водной массы на порядок больше, она понижена до 17–18 ‰.

В замерзающих морях определенный вклад в пресноводный баланс вносят процессы образования и таяния льда. При годовом осреднении они уравновешиваются, и только при однонаправленном переносе льдов через границы бассейна их вклад требует отдельной оценки.

Объектом воздействия речного стока является морская водная масса (ВМ). В изолированных морях она ограничена узкостями проливов и подводными порогами, в морях со свободным водообменном – гидрологическими фронтами. Для оценки переносов и баланса загрязняющих веществ

необходимо знать скорость обновления вод, от которой непосредственно зависит ассимиляционная емкость экосистемы. В морских бассейнах можно выделить режимы аккумуляции (обновление раз в несколько лет) и проточности (смена вод несколько раз в год).

Соленость внутренних морей умеренной зоны, как правило, резко понижена по отношению к океанической и, в зависимости от пресноводного баланса, подвержена сильной пространственно-временной изменчивости. В этих морях опреснение распространяется на всю водную толщу, но особенно сказывается на водах заливов и устьевых взморий. При этом следует различать зоны маргинального фильтра, где происходит непосредственное соприкосновение речных и морских вод, и прибрежные ВМ, соленость которых понижена в результате перемешивания. На внешней границе этих ВМ формируются гидрологические соленостные фронты, отделяющие их от вод океанического происхождения, во многих случаях тоже сильно трансформированных.

Водообмен и экологическое состояние прибрежных ВМ зависят преимущественно от речного стока, так как он действует однонаправленно и сосредоточен на локальных участках. Другие составляющие пресноводного баланса не нарушают естественный химический состав вод и только приводят к дополнительному опреснению или осолонению.

Для объективных оценок состояния морской среды необходимы прежде всего точные данные об объеме морских вод в рассматриваемых границах, чему не всегда уделяется должное внимание [1]. Режим температуры и солености морей, как правило, хорошо изучен, хотя мониторинг этих параметров не везде организован удовлетворительно. В то же время сведения о составляющих пресноводного баланса, как правило, недостаточны. Наблюдения за речным стоком не везде проводятся в замыкающих створах больших рек и не охватывают межбассейновые участки. Количество осадков и объемы испарения в море не измеряются. Из характеристик ледяного покрова, необходимых для расчета пресноводного баланса, измеряется только толщина льда. Поэтому предлагаемые ниже подходы не распространяются на моря арктического шельфа к востоку от Новой Земли, где ледяной покров очень динамичен, а данные об изменчивости солености, как правило, недостаточны.

Мы исходим из того, что соленость как консервативный показатель состояния морской среды по-

зволяет оценивать вклад речного стока в водный баланс и процессы обновления вод с точностью, достаточной для удовлетворения многих запросов практики. Такой поход был использован в работе [2] для исследования пресноводного баланса в океанических масштабах (оценки аномалий солености Арктического бассейна относительно Северной Атлантики).

Цель данной работы — изучить возможности использования показателя дефицита солености для оценок пресноводного баланса и водообмена в шельфовых морях и выявить особенности формирования прибрежных ВМ на примерах южных и северных морей России, подверженных воздействию речного стока.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данная работа носит преимущественно методический характер, поэтому в качестве материалов использована доступная информация по климату, гидрологическому режиму морей и речному стоку: гидрометеорологические справочники, ежегодники, сайт ЕСИМО и другие интернет-ресурсы.

При проведении расчетов мы ориентировались на среднегодовые показатели или суммарные годовые данные, так как водообмен в морях и обновление водных масс проявляются на продолжительных отрезках времени. Вместе с тем в ряде случаев сезонная изменчивость речного стока приводит к значительным смещениям границ водных масс и изменениям их объемов. Для отслеживания этих процессов необходим мониторинг солености поверхностного слоя и всех составляющих пресноводного баланса с высоким разрешением во времени, что пока труднодостижимо.

Дефицит солености прибрежной ВМ (или всего изолированного бассейна) можно интерпретировать как показатель вклада речных вод, участвующих в формировании морской среды. Он рассчитывается относительно солености прилегающих морских вод за пределами зоны воздействия речного стока (с некоторой условностью они могут быть названы ВМ океанического происхождения). Пренебрегая минерализацией речных вод (лишь в исключительных случаях достигающей 1 г/л), можно оценивать процентное содержание С пресных вод в морской ВМ как

$$C = \frac{S_{\rm o} - S_{\rm BM}}{S_{\rm o}},$$

где C выражается в долях единицы, $S_{\rm o}$ — соленость ВМ океанического происхождения, $S_{\rm BM}$ — соленость опресненной ВМ. В этих обозначениях абсолютный дефицит солености — разность ($S_{\rm o}$ — $S_{\rm BM}$), относительный — ($S_{\rm o}$ — $S_{\rm BM}$) / $S_{\rm o}$.

В общем случае [2] дефицит солености должен рассчитываться путем интегрирования этой величины от поверхности до дна. Здесь мы исходим из того, что в шельфовых морях соленость выравнивается по вертикали вследствие процессов перемешивания (в Азовском море – ветро-волнового, в Белом и Баренцевом морях – приливного и осенне-зимнего конвективного). В годовом цикле ее сезонные аномалии сглаживаются, и погрешность, обусловленная неоднородностью вертикальных распределений солености, не выходит за пределы точности оценок водного баланса морей и их частей. При годовом осреднении исключаются также сезонные вариации стока, осадков и испарения, которые во многих случаях могут быть значительными.

Если многолетние тренды солености на фоне ее межгодовых изменений невелики, постоянство ее средних многолетних значений обеспечивается компенсацией пресноводного баланса водообменом на морской границе ВМ:

$$W \cdot C \cdot N = F + 10^{-5} \cdot (P - E) \cdot Q$$

где W — объем BM, км³, N — кратность водообмена, 1/год, F — речной сток, км³/год, (P - E) — разность осадки — испарение, измеряемая в сантиметрах слоя (10^{-5} — переводный множитель), Q — площадь BM, км².

Очевидно, что результаты таких оценок существенно зависят от задания границ ВМ и точности определения составляющих пресноводного баланса. Границами ВМ являются фронты солености, которые, как правило, хорошо изучены по данным судовых съемок, но не поддаются определению методами дистанционного мониторинга (в отличие от термических фронтов). Сток крупных рек входит в систему гидрологического мониторинга, однако доступ к этим данным во многих случаях ограничен. Для оценки количества осадков используются данные береговых станций, а также косвенные методы пересчета повторяемости осадков в их количество [3]. Очевидно, что для каждой акватории такие зависимости должны рассчитываться отдельно по продолжительным сериям наблюдений.

Величина испарения с поверхности моря рассчитывается по формуле [4]

$$E = B_{10} \cdot W_{10} \cdot (e_0 - e_{10}), \tag{1}$$

где E — испарение, г/см- 2 · мин- 1 , B_{10} — размерный коэффициент, зависящий от скорости ветра и эффективного перепада температур в приводном слое (в свою очередь — функции перепадов температуры и влажности), W_{10} — скорость ветра на высоте 10 м над уровнем моря, м/с, e_0 , e_{10} , миллибар — насыщающая влажность воздуха соответственно у поверхности моря и на высоте 10 м.

Расчеты по формуле (1) заведомо не обеспечены данными океанологического мониторинга, а ее невысокая надежность следует хотя бы из того, что в качестве входного параметра используется скорость ветра, а не развитие ветрового волнения. При одной и той же скорости ветра волнение, в зависимости от разгона и времени действия ветра, может изменяться от умеренного до штормового, при котором происходит обрушение гребней волн, образование брызг и, следовательно, интенсификация испарения.

Из этих соображений мы отдаем предпочтение оценкам, основанным на дефиците солености, привлекая для их верификации и корректировки имеющиеся данные по составляющим пресноводного баланса морей.

ПРЕСНОВОДНЫЙ БАЛАНС И ОБНОВЛЕНИЕ ВОД ИЗОЛИРОВАННОЙ ВОДНОЙ МАССЫ

Рассмотрим с изложенных позиций закономерности формирования пресноводного баланса Азовского моря, отличающегося высокой степенью изоляции и значительной пространственно-временной изменчивостью солености. Здесь не ставится задача анализа ее многолетних колебаний, которые хорошо изучены и прослеживаются по мониторинговым данным [5]. Мы ориентируемся на климатические нормы солености, позволяющие оценить интенсивность водообмена для моря в целом и его важнейшей части — Таганрогского залива. Сведения о составляющих водного баланса приведены по данным сайта ЕСИМО [6].

В Азовском море, вследствие его небольшого объема, процессы опреснения и водообмена очень интенсивны. В пресноводном балансе значимы все составляющие, однако их соотношение резко различается в разных частях моря. Около 2/3 суммарного стока (оценки которого варьируют в зависимости от периода и в среднем близки к 35 км³) приходится на Таганрогский залив, который по гидрологическому режиму может считаться эстуарной зоной р. Дон, 1/3 на р. Кубань, вклад других рек незначителен. Испарение (около 35 км³) и осадки (15 км³) распределены равномерно по поверхности моря.

Отсюда следует, что на Таганрогский залив (14 % площади моря и 8 % его объема) приходится 2,8 км³ потери пресных вод за счет преобладания испарения над осадками, что составляет около 12 % стока Дона. Поэтому для Таганрогского залива ведущим фактором формирования режима солености является речной сток, тогда как для моря в целом значимы все три составляющих баланса.

Несмотря на небольшой объем водной массы, полного выравнивания солености в Азовском море не происходит. У Керченского пролива существует фронтальная зона с перепадом солености от 17 до 12 %, для открытой части моря в целом характерны значения 9–10 %. Опресненная ВМ Таганрогского залива отделена от открытого моря фронтом солености, который может не совпадать с гидрографической границей залива [7] и, очевидно, изменяет свое положение в зависимости от синоптических ситуаций. Поэтому оценки пресноводного баланса и водообмена для моря в целом более достоверны, чем для Таганрогского залива.

Как следует из приведенных выше данных, пресноводный баланс Азовского моря составляет около 15 км³ при объеме воды 300 км³ [8]. Принимая среднюю соленость черноморских вод равной 17,5 ‰, а азовских 9,5 ‰, получаем долю пресных вод около 46 % и кратность водообмена 0,11 (1 раз в 9 лет). Это означает обновление вод на 33 км³ ежегодно, что должно компенсироваться водообменом через Керченский пролив. Расчетные данные о притоке черноморских вод сильно варьируют, но в среднем за 1923–1985 гг. он оценивается в 36–38 км³, что можно считать хорошим согласованием.

Для ВМ Таганрогского залива понятие средней солености довольно условно, особенно с учетом изменчивости ее морской границы. В первом приближении ее можно принять равной 6 ‰, что означает абсолютный дефицит солености 3,5 ‰, относительный – 37 %. Кратность водообмена, отнесенная ко всему объему вод залива, составляет около 2,3 и соответствует периоду водообмена около 5 месяцев. Такая оценка может служить первым приближением при расчетах степени разбавления сточных вод, поступающих из бассейна Дона, и снижения концентрации загрязняющих веществ.

РЕЧНОЙ СТОК И ОБНОВЛЕНИЕ ВОД В ВОДНЫХ МАССАХ СО СВОБОДНЫМ ВОДООБМЕНОМ

В качестве актуального примера рассмотрим большую морскую экосистему (БМЭ) Баренцева и Белого морей [9]. Условия формирования ВМ в раз-

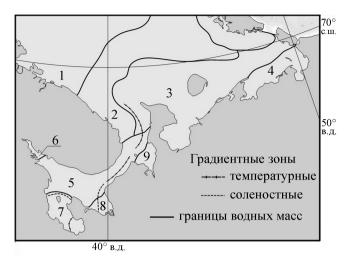


Рис. 1. Градиентные зоны и водные массы БМЭ Баренцева и Белого морей [по 8; 9]. Водные массы: 1 — атлантическая; 2 — баренцевоморская; 3 — канино-колгуевская; 4 — печорская; 5 — беломорская; 6 — кандалакшская; 7 — онежская; 8 — двинская; 9 — мезенская.

Fig. 1. Gradient zones and water masses of the Barents and White seas large marine ecosystems [by 8; 9]. Water masses: 1 – Atlantic; 2 – Barents sea; 3 – Kanin-Kolguev; 4 – Pechora; 5 – White Sea basin; 6 – Kandalaksha; 7 – Onega; 8 – Dvina; 9 – Mezen.

ных частях существенно различаются. ВМ западной и центральной частей Баренцева моря имеют океаническое происхождение и отличаются высокой однородностью полей солености при незначительных сезонных и многолетних изменениях. В заливах Белого моря и на юго-востоке Баренцева моря формируются прибрежные ВМ, в той или иной степени подверженные влиянию речного стока.

Оценка интенсивности водообмена для морских заливов, свободно сообщающихся с морем, как правило, не может быть получена путем натурных измерений. В таких условиях оценка водообмена через рассмотрение дефицита солености водных масс заливов представляется более объективной.

Речной сток между частями БМЭ Баренцева и Белого морей распределен крайне неравномерно. В западную часть Баренцева моря, относительно более глубоководную, поступает всего 4 % всех речных вод с водосбора. В то же время большой объем материкового стока приурочен к относительно мелководным районам Печорского и Белого морей. Такое неравномерное распределение речного стока и особенности питающих морских течений создают дефицит солености в прибрежных районах и заливах. Наибольшие различия в гидрологическом режиме ВМ наблюдаются в заливах крупных питающих рек: Печоры, Северной Двины, Мезени, Онеги.

Рассмотрим ВМ указанных заливов с позиции дефицита их солености. Для этого необходимо внести определенность в задание их границ. В научной литературе классификация и описание ВМ Баренцева и Белого морей приводились неоднократно [3; 9]. ВМ заливов Белого и юго-востока Баренцева морей отделены фронтами и хорошо определяются во все сезоны года. Устойчивые соленостные фронты ограничивают водные массы Онежского и Двинского заливов Белого моря. Воды Мезенского залива частично изолированы температурным фронтом [10]. Высокие приливы и интенсивное перемешивание в Мезенском заливе объясняет отсутствие выраженного халинного фронта на входе в залив, но, учитывая значительный речной сток в залив, можно ожидать пониженной солености вод залива. Заметно снижение солености воды и в вершине Кандалакшского залива. Исходя из вышесказанного и опираясь на существующую схему водных масс БМЭ Баренцева моря [9], мы определили границы водных масс заливов Белого моря (рис. 1).

Воды Печорского залива имеют пониженную соленость в течение всего года. Однако зимой сток р. Печора сильно ослабевает и халинный фронт сильно смещается в сторону устьевого взморья. Среднегодовая граница печорской ВМ показана с учетом морфометрии прибрежной зоны и направлений преобладающих поверхностных течений.

Оценку объемов ВМ Белого моря проводили неоднократно и с разной точностью. Объемы ВМ Баренцева моря до настоящего времени не рассчитывались. Точность таких расчетов относительна, так как критерии разграничения ВМ не однозначны, а границы градиентных зон изменчивы во времени и не поддаются четкому определению. Тем не менее для целей настоящей работы расчеты объемов необходимы, так как позволяют оценить вклад речного стока в формирование каждой ВМ в отдельности.

Нами были выполнены расчеты объемов воды, заключенных в границах, показанных на рисунке 1. Для этого были использованы топографические карты масштаба 1 : 1000000, полностью покрывающие Белое море, и батиметрическая карта Баренцева моря масштаба 1 : 25000000. Было рассчитано распределение площадей по ступеням глубин для каждой водной массы, а затем вычислен их объем (табл. 1).

Основными крупномасштабными факторами, формирующими гидрологический режим баренцево-беломорской экосистемы, являются: приток

вод атлантического происхождения через западную границу Баренцева моря, взаимодействие поверхностных ВМ с атмосферой, конвективное перемешивание вод в холодный период года и материковый сток. Региональная специфика гидрологического режима обусловлена доминированием вклада тех или иных факторов в разных частях моря [10].

Количество осадков над акваториями Баренцева и Белого морей соизмеримо с расходом воды на испарение. В таких условиях ведущим фактором формирования режима солености является речной сток.

При сравнении объемов водных масс с объемом поступающего в них речного стока обнаруживается, что последний наиболее значителен по отношению к объему печорской и двинской водных масс (см. табл. 1). Руководствуясь только этим соотношением, следовало бы предположить, что эти водные массы должны испытывать наибольший дефицит солености. Расчет дефицита следует вести последовательно от океанических водных масс, мало подверженных опресняющему влиянию речного стока, к более опресненным.

По материалам океанографической базы данных [11] нами была рассчитана средняя многолетняя соленость водных масс БМЭ Баренцева и Белого морей. При расчете дефицита солености для Баренцева моря отправной точкой служит соленость атлантической водной массы. Ее качественные характеристики близки к океаническим, разбавление речным стоком минимально, а средняя соленость отличается постоянством и составляет 34,5–35 % в течение всего года. В работе [2] среднее значение солености атлантических вод, поступающих в Арктический бассейн, принято равным 34,8 %.

Воды, поступающие через западную границу Баренцева моря и имеющие повышенную температуру и соленость, частично захватываются и переносятся системой течений на север, но большая часть атлантической воды перемещается течениями на восток. Разница температур между теплыми атлантическими водами и холодными водами центральной части Баренцева моря значительна. Благодаря этому здесь образуется термический фронт, отделяющий атлантическую водную массу от баренцевоморской. Средняя соленость баренцевоморской водной массы несколько ниже, чем атлантической, и составляет 34,24 ‰. При движении на юго-восток атлантические воды все сильнее опресняются, захватывая прибрежные воды, разбавленные речным стоком. Существенное снижение солености происходит при встрече со стоковым течением Тимонова, выносящим воды из Белого моря. К Печорскому морю подходит уже значительно опресненная канино-колгуевская водная масса со средней соленостью 32,85 %.

Из Баренцева моря вода попадает в Белое море с постоянным течением Дерюгина, которое движется вдоль Терского берега. К.М. Дерюгин считал Воронку и Мезенский залив частью Баренцева моря [12]. Основанием для этого служит сходство вод, заполняющих эти районы, и свободный водообмен с Баренцевым морем. Исходя из этого, дефицит солености водной массы Мезенского залива был рассчитан относительно баренцевоморской водной массы, остальных заливов Белого моря — относительно вод бассейна.

Рассчитанные нами средние многолетние (1870—2013) характеристики исследуемых водных масс приведены в таблице 2. Так как в доступной нам базе данных количество станций на акватории Белого моря (особенно в зимний период) недостаточно для корректного осреднения, в некоторых случаях были использованы осредненные данные и карты других авторов [8; 13—15].

Двинская ВМ является в среднем за год самой распресненной, что полностью соответствует соотношению между ее объемом и объемом поступающего в нее речного стока. Средняя годовая соленость печорской ВМ, несмотря на большой объем

Таблица 1. Объемы водных масс и поступающего речного стока **Table 1.** The volumes of the water masses and incoming river flow

Водная масса Water mass	Объем водной массы, км ³ Water mass volume, km ³	Объем стока, км³/год Runoff volume, km³/year
Печорская / Pechora	400	148
Мезенская / Меzen	150	35
Двинская / Dvina	195	143
Онежская / Onega	363	33
Кандалакшская / Kandalaksha	52	16

Водная масса Water mass	Средняя годовая соленость, % Annual average salinity, %	Абсолютный дефицит солености, % Absolute salinity deficit, %	Относительный дефицит солености, % Relative salinity deficit, %	Содержание пресных вод в водной массе, км³ Fresh water content in the water mass, km³	Период водообмена, год Period of water exchange, year	Объем водообмена, км³/год Rate of water exchange, km³/year
Печорская / Pechora	25,60	7,25	22	88,3	0,60	670,6
Мезенская / Меzen	25,74	8,50	25	37,2	1,33	112,8
Двинская / Dvina	16,77	10,35	38	74,4	0,69	283,0
Онежская / Onega	24,50	2,62	10	35,1	1,46	248,4
Кандалакціская / Kandalaksha	26.64	0.48	2	0.9	0.06	904.0

Таблица 2. Средние многолетние характеристики водных масс заливов Белого и Баренцева морей **Table 2.** The long-term average characteristics of water masses of the White Sea and Barents Sea bays

стока, оказалась сопоставима с соленостью водной массы Мезенского залива, испытывающего на себе постоянное мощное осолонение водами Баренцева моря. Дефицит солености печорской водной массы оказался не столь значителен в годовом цикле ввиду больших сезонных колебаний стока р. Печора. Климат водосбора Печорского залива значительно более суров, чем климат водосборов заливов Белого моря. Летом печорская водная масса сильно опресняется речным стоком. Сток р. Печора зимой сокращается более чем в 20 раз: в мае река приносит 32000 м³/с, а в январе – марте расходы воды не превышают 1500 м³/с. Малые реки водосбора Печорского залива зимой полностью замерзают, и сток в эту область сильно ослабевает. Это обуславливает значительные колебания солености печорской ВМ по сезонам года. К концу зимы дефицит ее солености понижается до 1-2 ‰, но благодаря мощному летнему опреснению в среднем за год оказывается значительным.

Другая ситуация складывается в более мягком климате водосбора Белого моря. Расходы рек этой области зимой сокращаются не столь значительно. Благодаря постоянной подпитке речными водами водные массы заливов сохраняют пониженную соленость в течение всего года.

Данные таблицы 2 позволяют ранжировать рассмотренные заливы по скорости обновления пресных вод. Наиболее застойными являются Онежский и Мезенский заливы, чему способствует сочетание морфометрии и небольших объемов речного стока. В Двинском заливе и устьевой области Печоры в среднем за год обновление вод происходит в 2–2,5 раза быстрее. Кандалакшский залив является практически проточным. Это служит независимым подтверждением его исключения из состава прибрежных ВМ Белого моря, что ранее было обосновано только экспертной оценкой [9].

Оценка водообмена между исследуемыми заливами и акваторией открытого моря ранее не проводилась. Для оценки корректности наших результатов применительно к арктическим морям рассчитаем при помощи показателя дефицита солености водообмен между Белым и Баренцевым морем. Пресноводный баланс Белого моря составляет около 240 км³ при объеме воды 6000 км³ [10]. Принимая среднюю соленость Баренцева моря равной 34 ‰, а беломорских вод 27 ‰, получаем долю пресных вод около 21 % и кратность водообмена 1 раз в 3,5 года. Это приводит нас к водообмену около 1700 км³ в год. Для Белого моря можно встретить оценки водообмена от 2200 [16] до 4000 км³ [17]. Водообмен между бассейном Белого моря и его заливами, очевидно, должен быть близок к внешнему водообмену всего моря. Суммарный водообмен бассейна с заливами был оценен нами в 1548 км³ в год.

Водообмен между Белым и Баренцевым морями испытывает влияние речного стока. Водный баланс Белого моря в течение всего года положительный, то есть речной сток (240 км³) и осадки над морем (~34 км³) доминируют над испарением (~22 км³) [10]. Водообмен между морями имеет сезонный максимум в период половодья на реках. В зимний период отмечается наиболее интенсивное поступление соленых вод в Белое море из Баренцева. В весенне-летнее время преобладает отток

воды в этот период не проникают далеко, и средняя соленость поверхностного слоя уменьшается до 22–23 ‰. Беломорские воды, в свою очередь, захватываются господствующими западными течениями и опресняют юго-восточную часть Баренцева моря. В период межени средняя соленость поверхностного слоя может возрастать до 31 ‰, причем наибольшее увеличение объема солей отмечено в северных акваториях моря (Воронка, Горло и Мезенский залив). В Воронке в зимний период соленость может достигать 34 ‰. Около 60 % солей поступает в Белое море в зимний период [10].

Таким образом, различия в гидрологическом режиме отдельных акваторий Белого моря оказываются весьма существенными. Интенсивность водообмена каждой ВМ с соседними определяет ее способность аккумулировать загрязняющие вещества (ЗВ). Поступая в водную массу с интенсивным водообменом, ЗВ быстро многократно разбавляются, не создавая экстремального загрязнения. Такой же объем ЗВ, сброшенных с водосбора в идентичную по объему, но относительно изолированную ВМ, может серьезно сказаться на ее качестве. В связи с этим нельзя давать оценку качества вод для моря в целом. Обобщенные оценки качества морской водной среды могут быть значительно искаженными [18; 19].

Данные о водообмене между отдельными акваториями моря, рассчитанном по дефициту солености, можно использовать для оценки степени влияния речного стока на качество морской среды и прогнозирования уязвимости отдельных акваторий при увеличении сбросов загрязняющих веществ с водосбора. Так как относительный дефицит солености опосредованно выражает количество пресных вод в ВМ, то, зная качество этих пресных вод, можно рассчитать их загрязняющую способность. Учесть качество вод, поступающих с осадками,

практически невозможно, но и объем ЗВ, приносимых с осадками, мал по сравнению с объемом ЗВ, поступающих со стоком с водосбора. Загрязняющее воздействие речного стока на отдельные акватории морей можно оценить как

$$K = \bar{A} \cdot C$$

где K — коэффициент загрязняющего воздействия речного стока на BM, C — относительный дефицит солености, пропорциональный содержанию пресных вод в морской BM, \bar{A} — средний взвешенный по водосбору класс качества воды по удельному комбинаторному индексу загрязненности воды (УКИЗВ).

$$\bar{A} = \frac{\sum A_n \cdot f_n}{\sum f_n},$$

где $A_{_n}$ — класс качества воды по УКИЗВ в замыкающих створах рек водосбора; $f_{_n}$ — годовой объем стока рек с определенным классом качества воды в замыкающем створе.

Таким образом, коэффициент *К* отражает степень влияния поступающего с речным стоком объема 3В на водную массу при существующих условиях водообмена. Расчет загрязняющего воздействия речного стока на ВМ заливов дал следующие результаты (табл. 3).

Принимая во внимание тот факт, что классы качества воды по УКИЗВ измеряются в пределах 1-5, а доля пресных вод даже в самом распресненном (Двинском) заливе не превышает 40 %, а в заливах с интенсивным водообменом может стремиться к 0, следует принять величину $0 < K \le 2$. В таком случае значения K, близкие к 1, говорят о высоком уровне загрязняющего воздействия речного стока на ВМ. Исходя из наших расчетов, двинская ВМ испытывает наибольшее воздействие со стороны речного стока, и необходимо сокращение сбросов ЗВ в реки водосбора Двинского залива. Согласно исследованиям других авторов, состояние вод Двинского

Таблица 3. Оценка загрязняющего влияния речного стока на водные массы **Table 3.** Assessment of runoff polluting effect on water masses

Водная масса Water mass	Ā	C (относительный) C (relative)	Коэффициент загрязняющего воздействия речного стока, K Coefficient of the runoff polluting impact, K
Печорская / Pechora	4	0,22	0,88
Мезенская / Mezen	4	0,25	0,99
Двинская / Dvina	3,5	0,38	1,34
Онежская / Onega	4	0,10	0,39
Кандалакшская / Kandalaksha	2	0,02	0,04

залива по уровню загрязнения превосходит другие заливы Белого моря и может быть оценено как критическое [20; 21].

Давать оценку качества ВМ только на основании *К* нельзя. Следует также учитывать антропогенные воздействия непосредственно на саму акваторию. Морское судоходство, портовые сооружения, коммунальное хозяйство и промышленность на побережье, захоронение отходов, изменение рельефа дна, разрушение берегов вследствие антропогенных воздействий могут оказывать ничуть не меньшее или даже более значительное загрязняющее влияние на ВМ. Тем не менее коэффициент загрязняющего воздействия рек на отдельные ВМ может быть полезен при планировании размещения предприятий-водопользователей и установлении режима их водопользования на водосборах морей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качество морских вод в зонах воздействия речного стока является результатом совокупного воздействия нескольких факторов: объемов поступления загрязненных вод с речным стоком, из-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Дженюк С.Л. 2008. Морфометрические характеристики шельфовых морей как элемент описания больших морских экосистем. В кн.: Природа шельфа и архипелагов европейской Арктики. Вып. 8. Материалы международной научной конференции (Мурманск, 9–11 ноября 2008 г.). М., ГЕОС: 112–116.
- Вязилова А.Е., Алексеев Г.В., Балакин А.А., Смирнов А.В. 2015. Влияние Арктики на формирование аномалий солености в Северо-Западной Атлантике и Северо-Европейском бассейне. Проблемы Арктики и Антарктики. 3(105): 39–50.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1: Баренцево море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. 1990.
 Л., Гидрометеоиздат: 280 с.
- 4. Океанографические таблицы. 1975. Л., Гидрометеоиздат:
- 5. Матишов Г.Г., Гаргопа Ю.М., Бердников С.В., Дженюк С.Л. 2006. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море. М., Наука: 304 с.
- Портал единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане. URL: http://esimo.ru (дата обращения: 26.04.2017).
- Матишов Г.Г., Григоренко К.С., Московец А.Ю. 2017. Механизмы осолонения Таганрогского залива в условиях экстремально низкого стока Дона. *Наука Юга России*.13(1): 35–43. doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43
- 8. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5: Азовское море. 1991. Л., Гидрометеозидат: 236 с.

менчивости составляющих пресноводного баланса, интенсивности водообмена на морских границах ВМ, подверженных загрязнению. Действующие подсистемы мониторинга морской среды (контроль уровней загрязнения, сбор и обобщение данных об источниках, гидрологические наблюдения в устьях рек) недостаточны для объективной оценки скорости обновления и процессов самоочищения морских вод. В этих условиях использование такого наглядного и легко определяемого показателя, как дефицит солености прибрежной ВМ по отношению к водам океанического происхождения, позволяет получить независимые оценки состояния морских экосистем. При этом годовое осреднение может быть только первым приближением. На шельфовых морях необходимо проводить мониторинг солености как минимум с сезонной, а речного стока - с помесячной дискретностью. Отсутствие таких данных (или доступа к ним) затрудняет анализ результатов более трудоемкого и дорогостоящего непосредственного контроля качества морской среды (который в открытых частях морей проводится с недостаточным пространственно-временным разрешением).

- 9. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Жичкин А.П., Моисеев Д.В. 2011. Батиметрические и океанографические факторы формирования БМЭ Арктики. В кн.: Комплексные исследования больших морских экосистем России. Под ред. Г.Г. Матишова. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 63–91.
- Филатов Н.Н., Тержевик А.Ю. 2007. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов. Петрозаводск, Карельский научный центр РАН: 349 с.
- 11. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П., Макаревич П.Р., Дженюк С.Л., Кулыгин В.В., Яицкая Н.А., Поважный В.В., Шевердяев И.В., Кумпан С.В., Третьякова И.А., Цыганкова А.Е. 2014. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Регион 1. Моря Восточной Арктики. Регион 2. Чёрное, Азовское и Каспийское моря. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 256 с.
- 12. Дерюгин К.М. 1923. К гидрологии Белого моря. Записки по гидрографии. 47: 35–80.
- Толстиков А.В. 2016. Изменчивость температуры поверхностного слоя Белого моря. М., ГЕОС: 212 с.
- Бабков А.И. 1998. Гидрология Белого моря. СПб., Беломорская биостанция: 94 с.
- 15. Бергер В.Я. 2007. *Продукционный потенциал Белого моря*. СПб., ЗИН РАН: 292 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2: Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. 1991. Л., Гидрометеоиздат: 240 с.
- 17. Елисов В.В. 1985. Расчет теплового баланса Белого моря. *Труды ГОИН*. 174: 107–112.

- 18. Романкевич Е.А., Айбулатов Н.А. 2005. Влияние морей России на здоровье человека. *Вестник РАН*. 75(1): 22–31.
- 19. Матишов Г.Г., Ильин Г.В. 2006. Ещё раз о влиянии морей России на здоровье человека. *Вестник РАН*. 76(4): 315–317.
- Кадашова Н.А. 2011. Физико-географические аспекты природопользования в Белом море. Дис. ... канд. геогр. наук. М.: 175 с.
- 21. Толстиков А.В., Чернов И.А. 2014. Антропогенное воздействие на экологическое состояние Белого моря. *Научно-исследовательские публикации*. 15(19): 19–31.

REFERENCES

- 1. Dzhenyuk S.L. 2008. [Morphometric characteristics of shelf seas as an element of large marine ecosystem description]. In: Priroda shel'fa i arkhipelagov evropeyskoy Arktiki: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. [Nature of the shelf and archipelagos of the European Arctic: proceedings of the international scientific conference (Murmansk, Russia, 9–11 November 2008)]. Moscow, GEOS: 112–116. (In Russian).
- 2. Viazilova A.E., Alekseev G.V., Balakin A.A., Smirnov A.V. 2015. [Influence of the Arctic on salinity anomaly formation in the north-west Atlantic and north European basin]. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 3(105): 39–50. (In Russian).
- 3. Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. T. 1: Barentsevo more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya. [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. 1: Barents Sea. No. 1: Hydrometeorological conditions]. 1990. Leningrad, Gidrometeoizdat: 280 p. (In Russian).
- 4. *Okeanograficheskie tablitsy.* [Oceanographic tables]. 1975. Leningrad, Gidrometeoizdat: 478 p. (In Russian).
- Matishov G.G., Gargopa Yu.M., Berdnikov S.V., Dzhenyuk S.L. 2006. Zakonomernosti ekosistemnykh protsessov v Azovskom more. [Regularities of ecosystem processes in the Sea of Azov]. Moscow, Nauka: 304 p. (In Russian).
- 6. Portal edinoy gosudarstvennoy sistemy informatsii ob obstanovke v Mirovom okeane. [Portal of the unified state information system on the situation in the World Ocean]. Available at: http://esimo.ru (accessed 26 April 2017). (In Russian).
- Matishov G.G., Grigorenko K.S., Moskovets A.Yu. 2017. [The salinization mechanisms in the Taganrog Bay under the conditions of Don River extremely low runoff]. *Nauka Yuga Rossii*. 13(1): 35–43. doi: 10.23885/2500-0640-2017-13-1-35-43
- 8. Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. T. 5: Azovskoe more. [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. 5: Sea of Azov]. 1991. Leningrad, Gidrometeoizdat: 236 p. (In Russian).
- Matishov G.G., Dzhenyuk S.L., Zhichkin A.P., Moiseev D.V. 2011. [Bathymetrical and oceanographical factors of the Arctic large marine ecosystems formation]. In: Kompleksnye issledovaniya bol'shikh morskikh ekosistem Rossii. [Integrated investigations of the Russian large marine ecosystems].

- G.G. Matishov (Ed.). Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 63–91. (In Russian).
- 10. Filatov N.N., Terzhevik A.Yu. 2007. Beloe more i ego vodosbor pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov. [The White Sea and its watershed under influences of climate and antropogenic impact]. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences: 349 p. (In Russian).
- 11. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Makarevich P.R., Dzhenyuk S.L., Kulygin V.V., Yaitskaya N.A., Povazhniy V.V., Sheverdyaev I.V., Kumpan S.V., Tret'yakova I.A., Tsygankova A.E. 2014. Atlas klimaticheskikh izmeneniy v bol'shikh morskikh ekosistemakh Severnogo polushariya (1878–2013). Region 1. Morya Vostochnoy Arktiki. Region 2. Chernoe, Azovskoe i Kaspiyskoe morya. [Atlas of Climatic Changes in Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1873–2013). Region 1. The Eastern Arctic Seas. Region 2. The Black Sea, the Sea of Azov, and the Caspian Sea]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 256 p. (In Russian).
- 12. Deryugin K. M. 1923. [On the hydrology of the White Sea]. *Zapiski po gidrografii*. 47: 35–80. (In Russian).
- 13. Tolstikov A.V. 2016. *Izmenchivost' temperatury poverkhnostnogo sloya Belogo morya*. [Variability of the surface layer temperature of the White Sea]. Moscow, GEOS: 212 p. (In Russian).
- 14. Babkov A.I. 1998. *Gidrologiya Belogo morya*. [*Hydrology of the White Sea*]. St. Petersburg, White Sea Biological Station: 94 p. (In Russian).
- Berger V.Ya. 2007. Produktsionnyy potentsial Belogo morya. [Production potential of the White Sea]. St. Petersburg, Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences: 292 p. (In Russian).
- 16. Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. T. 2: Beloe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya. [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. 1: White Sea. No. 1: Hydrometeorological conditions]. 1991. Leningrad, Gidrometeoizdat: 240 p. (In Russian).
- 17. Elisov V.V. 1985. [The calculation of the heat balance of the White sea]. *Trudy GOIN*. 174: 107–112. (In Russian).
- 18. Romankevich E.A., Aibulatov N.A. 2005. [The impact of Russian seas on public health]. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 75(1): 31–39.
- 19. Matishov G.G., Il'in G.V. 2006. [Once more on the impact of Russia's seas on human health]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*. 76(4): 315–317. (In Russian).
- 20. Kadashova N.A. 2011. Fiziko-geograficheskie aspekty prirodopol'zovaniya v Belom more. [Physical-geographical aspects of natural resources management in the White Sea. PhD Thesis]. Moscow: 175 p. (In Russian).
- 21. Tolstikov A.V., Chernov I.A. 2014. [Anthropogenic impact on ecological condition of the White Sea]. *Nauchnoissledovatel'skie publikatsii*. 15(19): 19–31. (In Russian).

Поступила 30.05.2017