

Ю.П.Ильин*, Ю.Н.Горячкин**, А.Н.Демидов*

**Морское отделение Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института, г.Севастополь*

***Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ УРОВНЯ МОРЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВОДНОГО БАЛАНСА АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА

Выполнено сопоставление ежемесячных отклонений среднего уровня Чёрного моря в 1993 – 2010 гг. от его среднего значения за период 1993 – 1999 гг., полученных по данным спутниковой альтиметрии и стандартных наблюдений на уровнях постах, расположенных вдоль черноморского побережья бывшего СССР. Установлено, что средняя величина аномалий уровня по альтиметрическим измерениям на 3 см превышает среднюю аномалию по стационарным наблюдениям, что составляет $12,7 \text{ км}^3$ в пересчете на площадь Черного моря. Коэффициент корреляции между среднемесячными величинами уровня, полученными двумя методами, составляет 0,8. Оба ряда имеют аналогичную сезонную и межгодовую изменчивость, а также достоверную положительную многолетнюю тенденцию (скорость роста уровня $0,3 \text{ см/год}$). По величинам приращений среднемесячных величин среднего уровня Черного моря, определенных по двум рядам, получены значения результирующего потока водообмена через пролив Босфор за 1993 – 2010 гг. при одинаковых среднемесячных значениях пресноводного бюджета моря и результирующего потока через Керченский пролив. Оба ряда потоков через Босфор не имеют многолетней тенденции за анализируемый период и демонстрируют практически совпадающую межгодовую изменчивость. Суммарный босфорский поток, полученный по альтиметрическим наблюдениям, превышает величины, оцененные по стационарным данным в холодную половину года и меньше их в теплую, в среднем, на 5 км^3 .

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *водный баланс, суммарный поток через пролив Босфор, уровень моря, спутниковая альтиметрия, корреляционный анализ*

Водный баланс (ВБ) является важнейшим комплексным режимобразующим фактором Азовского и Черного морей. Наряду с геохимическими условиями он определяет основные особенности гидрологического и гидрохимического режимов морей. Наиболее полно многолетние исследования водного баланса Черного моря и отдельных его составляющих были выполнены Севастопольским отделением ГОИН (с 1992 г. – МО УкрНИГМИ) [1 – 3]. В монографиях [1, 2] представлены результаты расчетов годовых и месячных величин составляющих водного баланса за 1923 – 1985 гг. Позднее эти ряды были продолжены по 1998 г. включительно [4].

В рамках программ международного сотрудничества по исследованию Азовского и Черного морей удалось произвести обмен данными и результатами расчетов с заинтересованными российскими организациями и продолжить ряды до 2010 г., однако такой путь не позволяет осуществлять полноценный регулярный мониторинг ВБ. Поэтому в [5] было рассмотрено современное состояние воднобалансовых исследований и намечены пути их про-

должения с учетом реальных возможностей. Как показано в [5 – 7], один из подходов к модификации методики расчета ВБ заключается в использовании спутниковых альтиметрических наблюдений вместо уровенных измерений на береговых гидрометеорологических станциях и постах. Согласно «стандартной» методике [1], среднемесячные данные об уровне моря необходимы как референтные для проверки величин изменений объема моря, полученных воднобалансовым методом. Но основное их назначение – расчет суммарного (результатирующего) потока водообмена Черного моря через пролив Босфор:

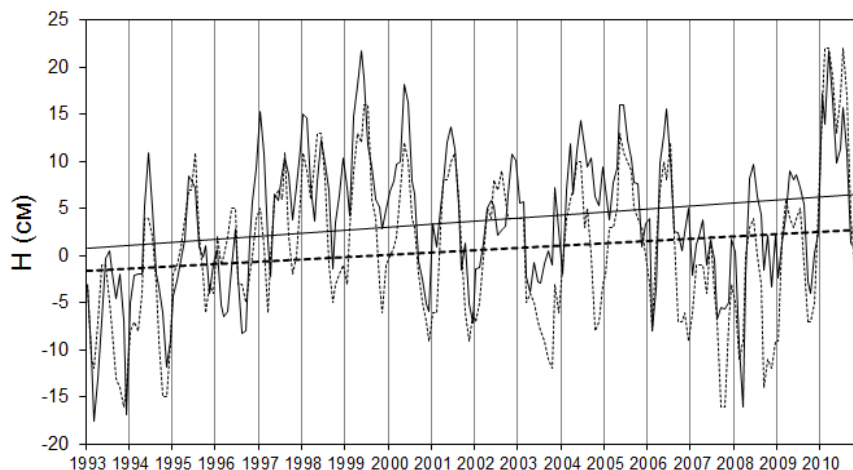
$$Q_B = Q_{нб} - Q_{вб} = 4,23\Delta H + Q_K - F, \quad (1)$$

где ΔH – изменение среднего уровня моря по данным измерений; Q_K – результирующий поток через Керченский пролив; F – пресноводный бюджет (речной сток + осадки – испарение). Потоки нижнебосфорского ($Q_{нб}$) и верхнебосфорского ($Q_{вб}$) течений затем определяются с помощью их эмпирических зависимостей от величины Q_B , полученных по данным гидрологических наблюдений в прибосфорском районе Черного моря [1].

В настоящее время достигнута приемлемая инструментальная точность альтиметрических измерений ~ 2 см. Сопоставление данных береговых постов с альтиметрическими данными на ближайших точках спутниковых треков в Черном море подтвердило возможность внедрения альтиметрических наблюдений для целого ряда задач региональной океанологии [8, 9]. В частности, альтиметрические измерения позволяют получать ежемесячные достоверные оценки средних по Черному морю величин аномалий уровня моря (АУМ). Учитывая тот факт, что 10 опорных уровенных постов, данные которых используются для оценки ΔH в формуле (1), расположены вдоль северных и северо-восточных берегов Черного моря, а средняя топография уровенной поверхности моря имеет вид котловины вследствие циклонической завихренности среднего поля течений, применение альтиметрических данных является априори более предпочтительным для рассматриваемых целей.

Основной целью настоящей работы является практическое применение в методике воднобалансовых расчетов [1] средних по Черному морю ежемесячных аномалий уровня, полученных по данным спутниковых альтиметров. Для этого, во-первых, выполняется их сопоставление с аналогичными аномалиями, построенными по данным опорных береговых уровенных постов за достаточно продолжительный период от начала «эры альтиметров» до настоящего времени, и, во-вторых, рассчитываются ежемесячные величины результирующего потока через пролив Босфор, которые затем сравниваются с величинами этих потоков, вычисленными по стандартной методике, при одних и тех же значениях пресноводного бюджета и потока через Керченский пролив.

Материалы и методы исследования. Использовался набор альтиметрических данных (комбинация измерений ИСЗ *Topex/Poseidon*, *Jason-1*, *Jason-2*), исправленных на изменения давления и влажность атмосферы. Этот продукт свободно распространяется в рамках проекта *AVISO* (<http://www.aviso.oceanobs.com>). Данные представляют собой отклонения уровня моря в каждой точке подспутникового трека от среднего его значения за 1993 – 1999 гг. Для оценки средних аномалий использовались среднемесячные значения, осредненные по всей площади моря. Таким образом, полу-



Р и с . 1 . Временной ход и многолетние тренды месячных аномалий среднего уровня Черного моря по данным альтиметрических измерений (—) и наблюдений на береговых станциях (- - -).

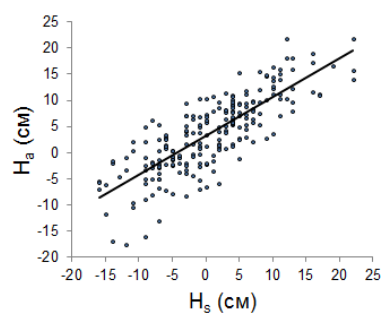
чен ряд среднемесячных АУМ (H_a) за 1993 – 2010 гг. (всего 216 значений).

По данным срочных наблюдений над уровнем моря на морских гидрометстанциях Одесса, Хорлы, Черноморское, Евпатория, Севастополь, Ялта, Феодосия, Анапа, Новороссийск, Туапсе построен ряд ежемесячных средних значений уровня Черного моря (H_s). Для удобства сопоставления с альтиметрическими данными эти величины были также приведены к виду аномалий от среднего значения за 1993 – 1999 гг. Сравнение выполнялось путем взаимного корреляционного анализа рядов H_a и H_s .

Результаты сравнения. На рис.1 представлены оба временных ряда АУМ, которые имеют аналогичную сезонную и межгодовую изменчивость, а также одинаковую достоверную (с вероятностью 95 % по критерию Фишера) положительную многолетнюю тенденцию среднегодовых значений (скорость роста уровня 0,3 см/год).

Средняя величина аномалий уровня по альтиметрическим измерениям на 3 см превышает среднюю аномалию по стационарным наблюдениям, что составляет $12,7 \text{ км}^3$ в пересчете на площадь Черного моря. Коэффициент корреляции между среднемесячными величинами уровня, полученными двумя методами, составляет 0,8, уравнение регрессии получено в виде (рис.2):

$$H_a = 0,74H_s + 3,35. \quad (2)$$



Ежемесячные значения АУМ подвержены значительной внутригодовой изменчивости, поэтому более корректное сопоставление двух рядов может быть сделано путем вычитания из исходного ряда квазипериодической ком-

Р и с . 2 . Корреляция средних аномалий уровня Черного моря по данным альтиметрических измерений H_a и наблюдений на береговых станциях H_s .

поненты – сезонного хода, аппроксимированного путем помесечного осреднения АУМ за весь период наблюдений (1993 – 2010 гг.), а также многолетнего линейного тренда. Коэффициент корреляции между ежемесячными отклонениями уровня моря от указанных детерминированных компонент незначительно снизился (0,78), а уравнение регрессии приобрело вид (штрихи у переменных обозначают отклонения):

$$\hat{H}_a = 0,79\hat{H}_s + 0,05. \quad (3)$$

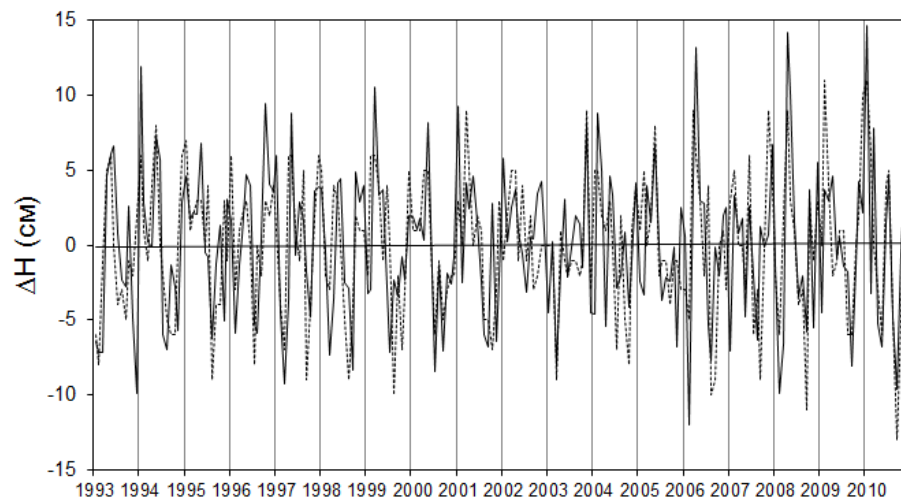
В уравнении (1) используются приращения среднего уровня Черного моря от месяца к месяцу, то есть разности ΔH между данным и предшествующим месяцем. Сравнение этих изменений для двух рядов АУМ (рис.3) показало, что коэффициент корреляции между ними существенно меньше, чем в предыдущих случаях (0,61), а связь описывается уравнением регрессии:

$$\Delta H_a = 0,65\Delta H_s + 0,03. \quad (4)$$

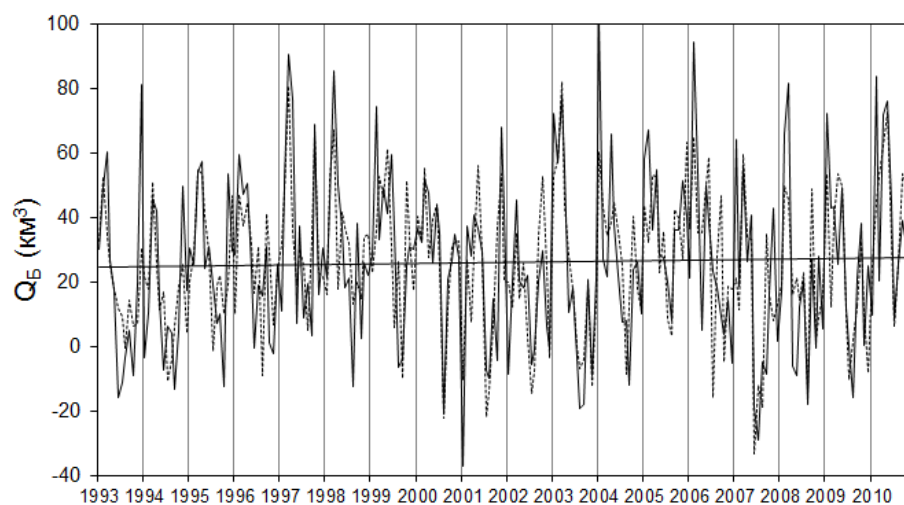
Вышеприведенные результаты сопоставления показывают, что месячные величины средних для моря АУМ, полученные контактными и дистанционными способами наблюдений, в целом хорошо согласуются, поэтому в дальнейшем для воднобалансовых расчетов можно пользоваться доступными альтиметрическими данными. Соответствие изменений среднего уровня несколько хуже вследствие естественных причин (недостаточного описания колебаний уровня всего моря наблюдениями только на его северных берегах) и уменьшения отношения «сигнал/шум» при вычислении месячных приращений.

С методической точки зрения, в дальнейшем для пересчета водного баланса за годы, предшествующие «эре альтиметров», целесообразно восстанавливать величины средних по морю ежемесячных АУМ с помощью уравнения (2), обеспечивающего наиболее тесную зависимость.

Результаты расчета суммарного потока через пролив Босфор. На основе рядов приращений среднего уровня моря, показанных на рис.3, по урав-



Р и с . 3 . Временной ход месячных приращений среднего уровня Черного моря по данным альтиметрических измерений (—) и наблюдений на береговых станциях (- - -).



Р и с . 4 . Временной ход ежемесячных значений результирующего потока через пролив Босфор по данным альтиметрических измерений (—) и наблюдений на береговых станциях (- - -).

нению (1) были вычислены ежемесячные величины суммарного (результирующего) потока через пролив Босфор, необходимые для последующей оценки приходной и расходной частей водного баланса. Остальные величины, входящие в правую часть уравнения (1), были взяты одинаковыми, рассчитанными по стандартной методике [1].

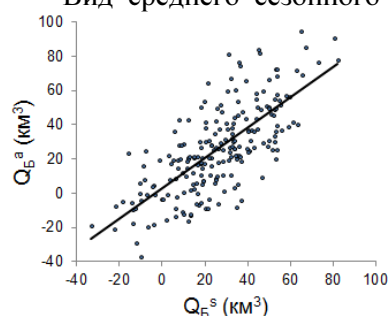
Полученные ряды представлены на рис.4, а диаграмма рассеяния месячных «альтиметрических» и «станционных» потоков – на рис.5 (коэффициент корреляции 0,73). Уравнение регрессии имеет вид:

$$Q_B^a = 0,89Q_B^s + 2,88. \quad (5)$$

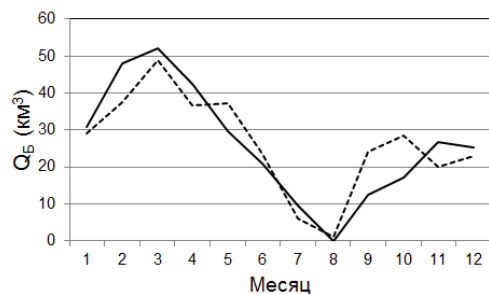
Как видно, связь в уравнении (5) более тесная, чем между приращениями АУМ в (4), хотя остальные слагаемые формулы (1) не менялись. Это объясняется тем, что в рамках данного подхода пресноводный бюджет вносит большой вклад в суммарный поток через Босфор [4], поэтому отношение «сигнал/шум» для формулы (5) соответственно повышается.

В целом, оба ряда Q_B не имеют многолетней тенденции за исследуемый период 1993 – 2010 гг., а межгодовая изменчивость потока через пролив Босфор описывается почти одинаково. Различия на масштабах 1 – 2 месяцев носят ожидаемый характер по причине, указанной выше.

Вид среднего сезонного хода результирующего босфорского потока, вычисленного по станционным и альтиметрическим наблюдениям, представлен на рис.6, а численные значения средних многолетних величин – в табл.1.



Р и с . 5 . Корреляция месячных значений результирующего потока через пролив Босфор, рассчитанных по данным альтиметрических измерений Q_B^a и наблюдений на береговых станциях Q_B^s .



Р и с . 6 . Средний за 1993 – 2010 гг. сезонный ход результирующего потока через пролив Босфор, рассчитанный по данным альтиметрических измерений (—) и наблюдений на береговых станциях (- -).

Т а б л и ц а 1 . Среднемноголетние месячные значения и годовая величина результирующей босфорского потока (км^3), полученные по станционным и альтиметрическим наблюдениям уровня Черного моря.

месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	год
Q_B^a	30,8	48,0	52,0	42,4	29,6	20,8	9,5	-0,2	12,4	17,0	26,6	25,3	315
Q_B^s	29,0	37,4	48,9	36,7	37,2	23,4	5,9	1,1	24,0	28,5	20,1	22,9	314

Из графиков рис.6 видно, что Q_B имеет выраженный сезонный ход, определяемый сезонными изменениями пресноводного бюджета. Максимальная за год величина результирующего босфорского потока, около 50 км^3 , отмечается в марте, когда прямой поток (верхнебосфорское течение) значительно превышает обратный (нижнебосфорское течение). Минимальная величина, близкая к 0, наблюдается в августе, когда потоки через пролив минимальны и имеют близкие величины. В октябре (по станционным наблюдениям) и ноябре (по альтиметрическим наблюдениям) результирующий поток имеет вторичный максимум. Суммарный босфорский поток, полученный по альтиметрическим наблюдениям превышает величины, оцененные по станционным данным в холодную половину года и меньше их в теплую, в среднем, на 5 км^3 . Оба вида использованных данных дают практически одинаковую величину среднемноголетнего суммарного босфорского потока за год (табл.1). Формула (5) может использоваться в дальнейшем для прямого согласования (без полного расчета компонент баланса) ежемесячных рядов суммарного босфорского потока, полученных по альтиметрическим данным, с рядами полученными до «эры альтиметров».

Поскольку целью данной работы не являлась модифицированная оценка всех компонент водного баланса Черного моря, нет смысла обсуждать подробно величину одной из его составляющих – суммарного годового потока воды через пролив Босфор. Отметим лишь, что эта величина значительно превышает среднюю оценку, полученную по стандартной методике за 1960 – 1998 гг. (258 км^3), а также оценки, полученные в рамках совместного решения уравнений водного и солевого балансов ($261 – 277 \text{ км}^3$) для того же периода [4]. Полный обзор оценок, полученных разными авторами для различных периодов времени, приведен в монографии [10].

Заключение. На основе выполненных в данной работе расчетов можно заключить, что использование альтиметрических данных об изменениях среднего уровня Черного моря позволяет адекватно оценивать одну из важнейших компонент водного баланса – суммарного потока воды через пролив

Босфор. Получены эмпирические формулы для согласования рядов уровня моря и босфорского потока, рассчитанных на основе разных методов уровневых наблюдений (контактных береговых и спутниковых альтиметрических).

Учитывая отсутствие свободного доступа к береговым уровням наблюдениям других стран Азово-Черноморского бассейна, изложенный подход позволит продолжить регулярный мониторинг водного баланса. Для этого необходимо также пересмотреть методики оценки составляющих пресноводного бюджета в соответствии с возможностями, предоставленными современными данными спутниковых наблюдений и ре-анализа, распространяемыми через Интернет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия.*– С.-Пб.: Гидрометеоиздат, 1991.– 430 с.
2. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.V. Азовское море.*– С.-Пб.: Гидрометеоиздат, 1991.– 236 с.
3. *Ильин Ю.П., Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Горбач С.Б.* Гидрометеорологические условия морей Украины. Т.1. Азовское море.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– 402 с.
4. *Ильин Ю.П.* Долгопериодные изменения водообмена между Черным и Эгейским морями в рамках крупномасштабной бокс-модели // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003.– вып.8.– С.144-151.
5. *Ильин Ю.П., Симов В.Г., Репетин Л.Н.* Проблемы и перспективы мониторинга водного баланса Черного и Азовского морей // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып.22.– С.175-181.
6. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А., Лемешко Е.М., Липченко М.М.* Использование альтиметрических данных для расчета водного баланса Черного моря // Морской гидрофизический журнал.– 2003.– № 6.– С.46-55.
7. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А.* Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– 211 с.
8. *Кубряков А.А., Станичный С.В.* Анализ пространственной и временной изменчивости уровня Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.18.– С.101-113.
9. *Кубряков А.А.* Динамические характеристики верхнего слоя Черного моря по альтиметрическим измерениям / Автореферат дисс. ... канд. физ.-мат. наук.– Севастополь: МГИ НАНУ, 2012.– 20 с.
10. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– 209 с.

Материал поступил в редакцию 21.11.2012 г

АНОТАЦІЯ. Виконане порівняння щомісячних відхилень середнього рівня Чорного моря в 1993 – 2010 рр. від його середнього значення за період 1993 – 1999 рр., отриманих за даними супутникової альтиметрії і стандартних спостережень на рівневих постах, розташованих уздовж чорноморського узбережжя колишнього СРСР. Встановлено, що середня величина аномалій рівня за альтиметричними вимірюваннями на 3 см перевищує середню аномалію за станційними спостере-

женнями, що складає $12,7 \text{ км}^3$ у перерахунку на площу Чорного моря. Коефіцієнт кореляції між середньомісячними величинами рівня, отриманими двома методами, складає 0,8. Обидва ряди мають аналогічну сезонну і міжрічну мінливість, а також достовірну позитивну багаторічну тенденцію (швидкість зростання рівня $0,3 \text{ см/рік}$). За величинами прирощень середньомісячних значень середнього рівня Чорного моря, визначених для двох рядів, отримані величини результуючого потоку водообміну через протоку Босфор за 1993 – 2010 рр. при однакових середньомісячних значеннях прісноводного бюджету моря і результуючого потоку через Керченську протоку. Обидва ряди потоків через Босфор не мають багаторічної тенденції за період, що аналізується, і демонструють практично співпадаючу міжрічну мінливість. Сумарний босфорський потік, отриманий за альтиметричними спостереженнями, перевищує величини, оцінені за станційними даними, впродовж холодної половини року і менше за них у теплу, у середньому, на 5 км^3 .

ABSTRACT. The comparison was done for the Black Sea monthly mean sea level deviations from its mean values for the period of 1993 – 1999 in 1993 – 2010, by satellite altimetry and standard observations on sea level gougues along the former USSR Black Sea shores. It was stated that the mean value of sea level anomalies obtained by altimetry data exceeds the mean sea level anomaly obtained by shore stations data by 3 cm which is 12.7 км^3 in recalculation for the Black Sea area. The correlation coefficient between the monthly sea level anomalies obtained by the both methods is 0.8. The both time-series have the similar seasonal and inter-annual variability, as well as the reliable positive tendency (sea level rise 0.3 cm/year). Using the Black Sea level monthly increments obtained for the both time-series, the Bosphorus net water fluxes were found for every month of 1993 – 2010 at the same monthly freshwater budget and the Kerch Strait net water flux values. The both time-series of the Bosphorus net flux have no long-time tendency for the period analyzed and demonstrate almost the same inter-annual variability. In seasonal rate, the net flux through the Bosphorus Strait obtained by altimetry measurements exceeds the values calculated by stations level data for the cold half of year and less for the warm one, in average, by 5 км^3 .