

Экспериментальные и экспедиционные исследования

УДК 551.465

Ю.Н. Горячкин, В.А. Иванов, Е.М. Лемешко, М.М. Липченко

Использование альтиметрических данных для расчета водного баланса Черного моря

Сравниваются оценки расходов верхнебосфорского и нижнебосфорского течений, полученные с использованием альтиметрических данных об уровне Черного моря и данных береговых постов. Ранее в качестве среднего уровня моря, необходимого при оценке водообмена, использовался средний уровень, рассчитанный по данным береговых постов, расположенных на побережье бывшего СССР. Показано, что сезонный и годовой ход приращений среднего уровня моря качественно подобен для обоих типов данных. Вместе с тем величины амплитуд сезонного хода существенно различны. Использование приращений среднего уровня моря по данным альтиметрии приводит к незначительному изменению годового водообмена через Босфор по сравнению с береговыми данными, однако имеются различия в сезонном ходе. Предлагается алгоритм расчета приращений уровня моря, по мнению авторов, уменьшающий ошибку расчета водного баланса.

Появление высокоточных альтиметрических данных об уровне моря, обеспечивающих точность наблюдений до ± 2 см, дает возможность использовать их для уточнения величины водного баланса Черного моря на основе коррекции среднего уровня. Ранее эта величина рассчитывалась как среднее значение по данным 12 уровенных постов и использовалась в методике [1] для замыкания уравнения водного баланса. Возникает вопрос, насколько эта величина соответствует реальному положению среднего уровня, за который в настоящей работе принимаются осредненные по глубоководной части моря значения уровня по данным французско-американского ИСЗ *TOPEX/Poseidon*. Цель работы — в определении невязки в получении среднего уровня моря и, соответственно, в уточнении амплитуды и фазы водообмена через Босфор.

В работе использовались среднемесячные данные 12 уровенных постов: (Гриморское, Одесса, Хорлы, Черноморское, Евпатория, Севастополь, Ялта, Феодосия, Новороссийск, Туапсе, Поти и Батуми) за 1992 – 1998 гг. Также за этот период использовались подекадные данные альтиметра со спутника *TOPEX/Poseidon* на всех греках, проходящих через Черное море.

Для лучшей сравнимости данные наблюдений береговых станций и альтиметра были подготовлены по единой методике. В качестве исходных для береговых станций использованы среднемесячные значения уровня моря, которые рассчитаны как среднее по двенадцати вышеуказанным станциям. Затем было определено среднее значение уровня за 1993 – 1995 гг., после чего

© Ю.Н. Горячкин, В.А. Иванов, Е.М. Лемешко, М.М. Липченко, 2003

для каждого месяца рассчитывались аномалии от среднего. Такая методика была применена в связи с использованием этого алгоритма расчета аномалий уровня по определениям альтиметра ИСЗ *TOPEX/Poseidon*. Использовались подекадные значения аномалий уровня, рассчитанные по альтиметрическим данным, которые приводились к среднемесячным величинам, после чего осреднялись по всей акватории Черного моря. Область выборки была ограничена изобатой 100 м (на глубинах менее 100 м данные исключались), чтобы уменьшить погрешность и исключить влияние эффектов шельфовой и прибрежной зон. Для лучшей сравнимости использовались данные альтиметров, не скорректированные на изменения давления. В результате удалось добиться максимальной однородности данных.

Для оценки обмена через пролив Босфор применялись методы расчета баланса пресных вод Черного моря, водообмена через Керченский пролив [1] и параметризация А.К. Богдановой [2], основанная на использовании косвенных данных о расходах воды через Босфор.

Эмпирические зависимости для расчета составляющих водообмена представляются в виде:

$$Q_B^H = f(Q_B^R), \quad (1)$$

$$Q_B^B = f(Q_B^R), \quad (2)$$

где Q_B^H и Q_B^B — расходы воды соответственно нижнебосфорского (приток) и верхнебосфорского (отток) течений. В свою очередь

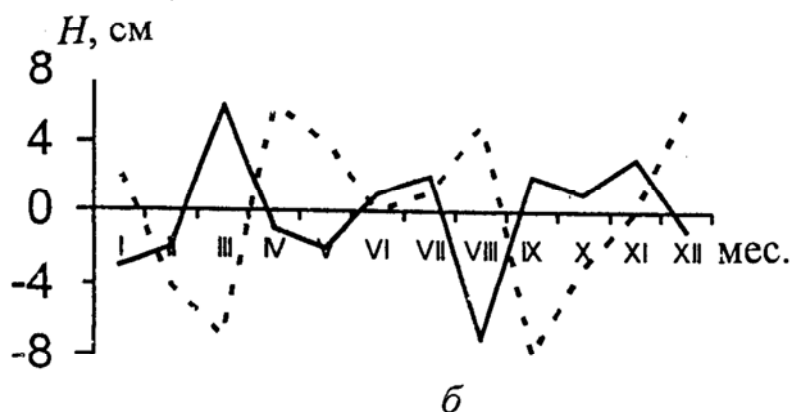
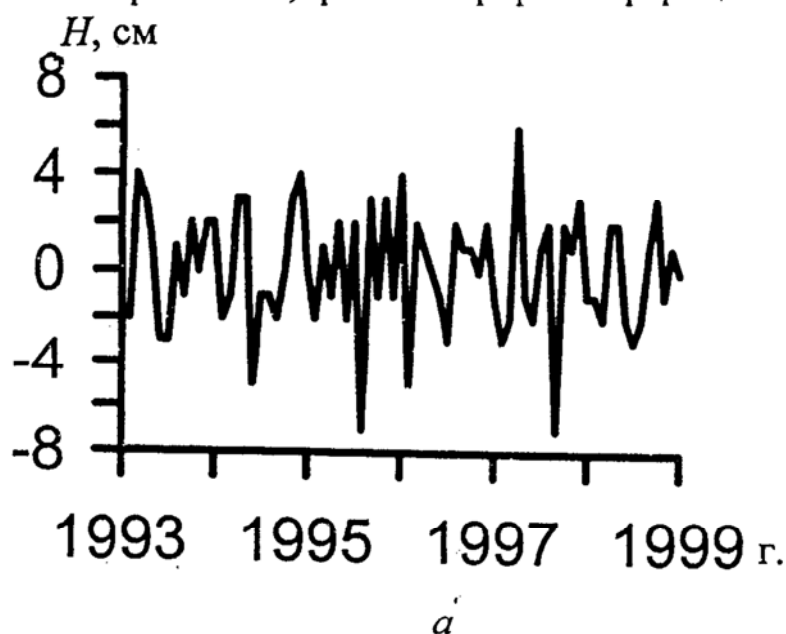
$$Q_B^P = N - \Delta B + Q_K^R, \quad (3)$$

где $Q_B^P = Q_B^B - Q_B^H$ — результирующий водообмен через Босфор; Q_K^R — результирующий водообмен через Керченский пролив; $N = Q_p + Q_o - Q_{и}$ — баланс пресных вод Черного моря; Q_p — суммарный речной сток в море; Q_o — атмосферные осадки на поверхности моря; $Q_{и}$ — испарение с поверхности моря; $\Delta B_i = B_i - B_{i-1}$ — приращение объема моря, вычисляемое через средний уровень ($B = H_{cp} \times F$; $F = 423 \cdot 10^3 \text{ км}^2$).

Использование настоящей методики для косвенной оценки составляющих водообмена через Босфор основывается на гипотезе, согласно которой отток вод из Черного моря происходит под воздействием горизонтального градиента давления, создаваемого балансовым приращением уровня (не учитывается непосредственное влияние ветра за счет тангенциального напряжения на поверхности). При этом принимается, что действие всех сил оказывается мгновенным, т. е. не учитывается время, необходимое для аккумуляции речных вод и атмосферных осадков в море.

В [1] для расчета помесечных приращений уровня использовался алгоритм центральных разностей с шагом два месяца. Использование такого алгоритма, на наш взгляд, не вполне оправданно, т. к. приводит к искажению времени наступления максимумов и занижению изменений объема моря. При этом наибольшие искажения будут в период наибольшей изменчивости уровня. Кроме этого, характерное время приспособления уровня моря со-

ставляет около одного месяца, что является дополнительным аргументом в использовании алгоритма первых разностей: $\Delta B_i = B_i - B_{i-1}$, где i -текущий месяц. Действительно, анализ разницы в приращениях уровня, полученных с помощью двух методик, показал следующие результаты. Среднемесячные различия в приращениях уровня могут достигать ± 7 см (рис. 1). Величина дисперсии разницы сопоставима с самой дисперсией в приращениях уровня и составляет 30-50% от последней, в зависимости от типа использованных данных (альтиметрия или береговые посты). Насколько велика ошибка, видно из графика годового хода на рис. 1. Причем максимальная ошибка как раз и соответствует периодам максимальных приращений уровня. Фактически ее величина соответствует, например, вкладу атмосферных осадков в общий баланс. Кроме этого, сравнение графиков приращений показывает сдвиг по фазе.



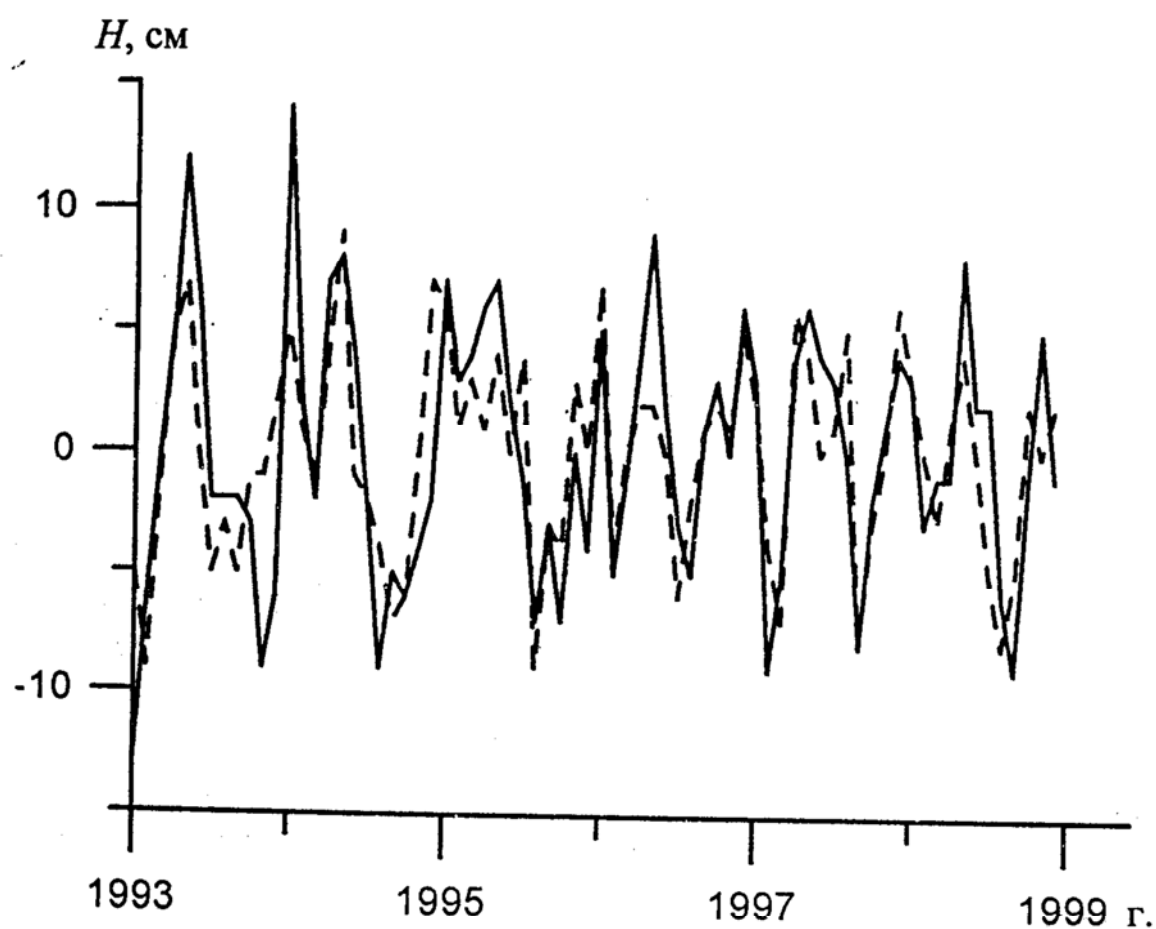
Р и с. 1. Временной ход разницы приращений среднего уровня моря, рассчитанных по обеим методикам – а; типичный годовой ход разницы (сплошная) и приращений (штриховая) уровня – б

Сравнение приращений аномалий уровня моря по данным альтиметрии и береговых уровенных постов показывает, что изменчивость как месячных, так и годовых значений качественно подобна (рис. 2, 3). Коэффициент корреляции между среднемесячными значениями составляет 0,74. Более подробно результаты сравнения береговых и альтиметрических данных уровня, а также влияния атмосферного воздействия на его изменчивость приведены в [3–4–5].

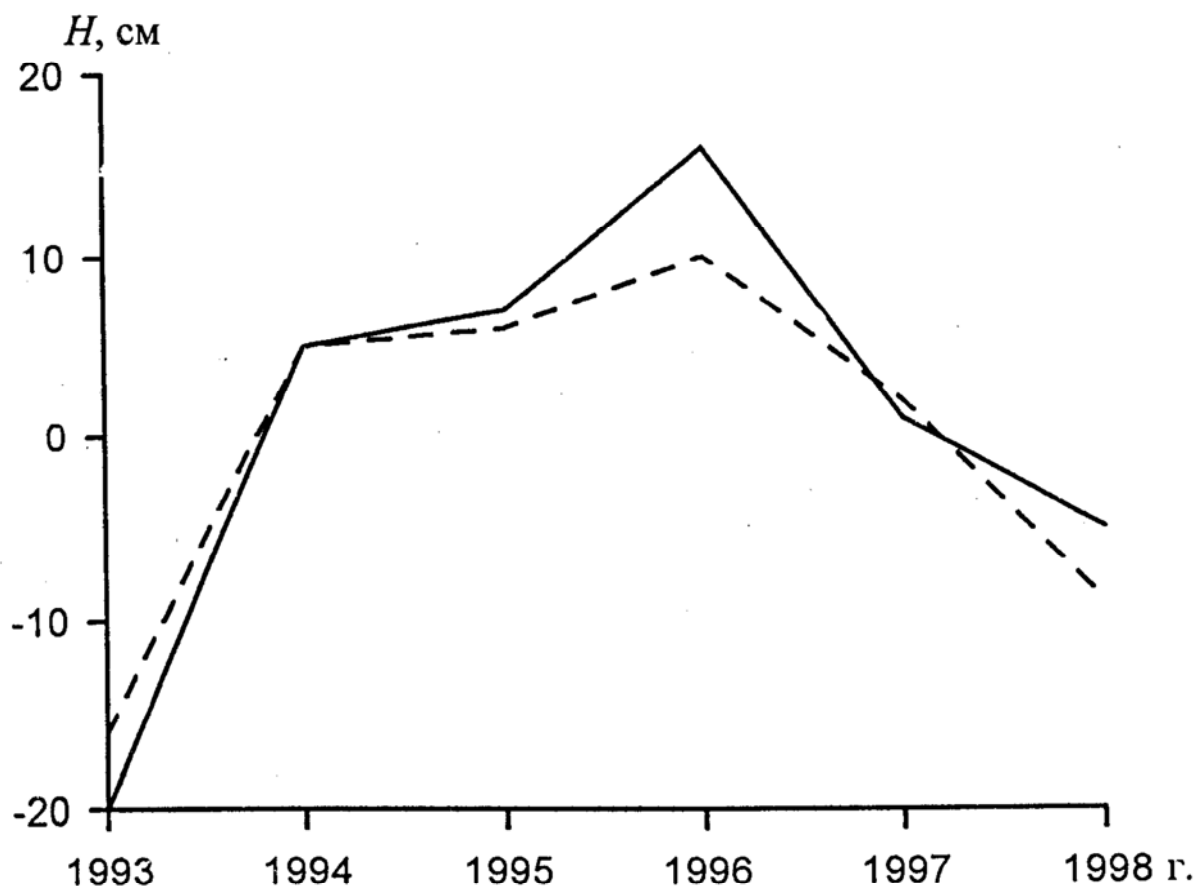
Обращает на себя внимание тот факт, что по среднемесячным данным большие амплитуды колебаний приращений уровня моря соответствуют данным альтиметра, а не данным береговых

станций. Эта разница увеличивается в зимний период, что, возможно, обусловлено увеличением наклонов уровня моря в результате интенсификации циркуляции. Вместе с тем величины годовых приращений практически одинаковы. Для объяснения этого факта рассмотрим рис. 4. Видно, что разность приращений уровня имеет выраженный сезонный ход. В мае-июне она дости-

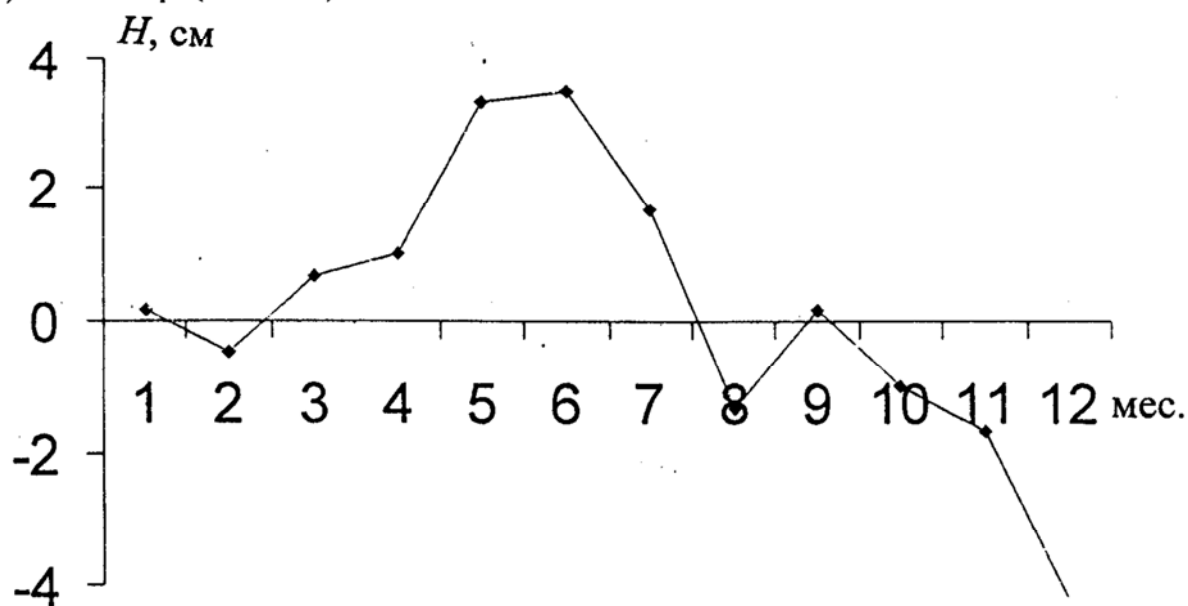
гает максимума, т. е. приращение уровня по данным альтиметра превышает приращение уровня по данным береговых станций. В декабре наблюдается минимум, т. е., наоборот, приращение уровня на береговых станциях превышает соответствующие значения по данным альтиметра. Это различие впервые было отмечено в [3], где сравнивались данные отдельных уровенных постов с конкретными треками. При этом максимальная разница отмечалась для западной части моря в марте, для центральной — в апреле, для восточной — в мае. Осредненная картина дает более сглаженный ход сезонной изменчивости. При этом максимум и минимум составляют ~ 4 см, что в пересчете на площадь моря соответствует величине ~ 17 км³. В целом сезонный ход разницы между альтиметрическими данными и данными береговых постов повторяет ход сезонной изменчивости стока рек со сдвигом на один месяц, что естественно, поскольку рассматривается не уровень моря, а его приращения.



Р и с. 2. Помесячные приращения аномалий уровня моря по данным береговых станций (штриховая) и альтиметра (сплошная)



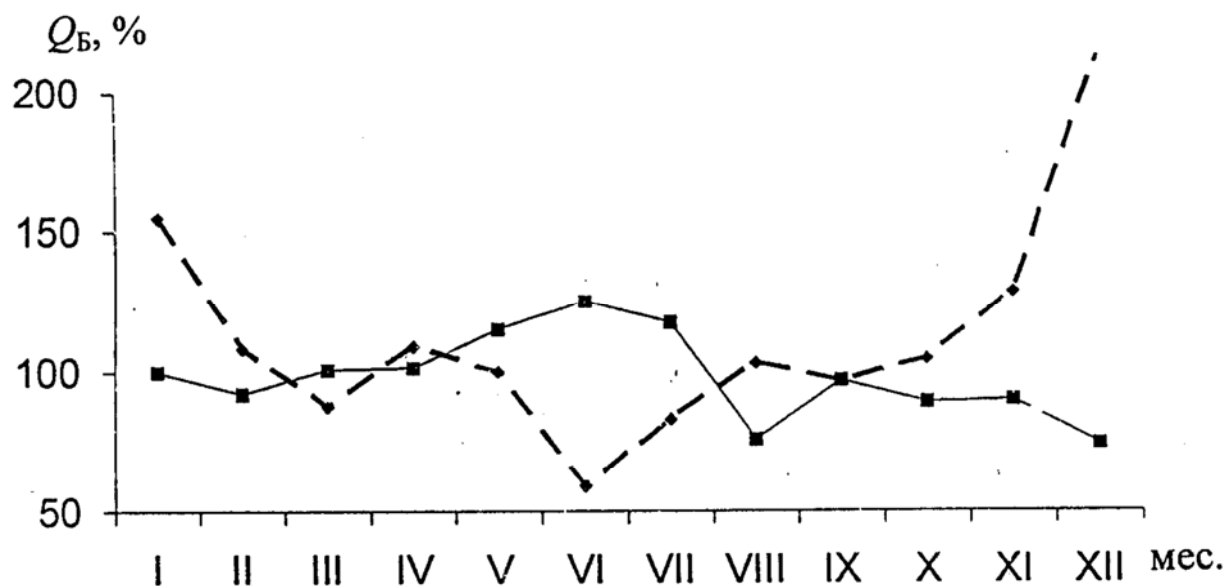
Р и с. 3. Годовые приращения аномалий уровня моря по данным береговых станций (штриховая) и альтиметра (сплошная)



Р и с. 4. Средний годовой ход разницы аномалий приращений уровня по данным альтиметра и береговых станций (1993 – 1998)

Так как в описанной выше методике (1) – (3) расходы верхнебосфорского и нижнебосфорского течений являются нелинейной функцией изменения уровня Черного моря, следует рассмотреть, какое влияние на них оказывают различия в данных альтиметра и береговых станций. Коэффициент корреляции для расходов, полученных с использованием данных альтиметра и бере-

говых станций, составляет $\sim 0,9$ для обоих течений. Разница в годовых расходах крайне незначительна и не превышает 3 – 5% от суммарного расхода, при этом наблюдается хорошее качественное соответствие. Для внутригодового хода картина несколько иная. На рис. 5 представлена расчетная среднемесячная разница в расходах при использовании обоих типов. За 100 % приняты расходы, рассчитанные по береговым станциям. Наименьшая относительная разница отмечается для верхнебосфорского течения. Она колеблется от +25 до – 25%. Причем максимум положительной разницы соответствует максимуму его расхода со сдвигом на один месяц (максимум расхода в мае), максимум отрицательной разницы — периоду ослабления течения. Для нижнебосфорского течения разница существенно выше. Разброс составляет от +113 до – 17%. Минимальная разница соответствует периоду усиления течения в августе, а максимальная положительная — периоду ослабления течения.



Р и с. 5. Разница в процентах расходов верхнебосфорского (сплошная) и нижнебосфорского (штриховая) течений при использовании данных альтиметра и береговых станций

В заключение отметим, что результаты работы можно применить для уточнения методики [1]. Это позволит использовать имеющиеся долговременные данные по компонентам водного баланса и уровня моря за период до начала альтиметрических наблюдений (1923–1992) и уточнить особенности межгодовой и сезонной изменчивости водообмена через Босфор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моря СССР. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 4. Черное море. Вып. 1. – СПб.: Гидрометеониздат, 1991. – 422 с.
2. Богданова А.К. Сезонные и межгодовые колебания водообмена через Босфор//Биология моря. – 1972.– Вып.27.– С. 41 – 45.
3. Горячкин Ю.Н., Лемешко Е.М., Иванов В.А. Использование альтиметрических данных для изучения внутрисезонных и межгодовых колебаний уровня Черного моря//Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. – С. 262 – 269.

4. Лемешко Е.М., Иванов В.А., Белокопытов В.Н., Горячкин Ю.Н. Сравнительный анализ отклика уровня Черного моря на атмосферное воздействие в прибрежной и глубоководной зонах моря//Глобальная система наблюдений Черного моря: фундаментальные и прикладные аспекты. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – С. 56 – 70.
5. Stanev E.V., Le Traon P.-Y., Penervia E.L. Sea level variations and their dependency on meteorological and hydrological forcing: analysis of altimeter and surface data for the Black Sea//J. Geophys. Res. – 2000. – 105, № C7. – P. 17203 – 1721.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
Морское отделение УкрНИГМИ,
Севастополь

Материал поступил в
редакцию 05.05.02

ABSTRACT Estimates of discharges of the upper and lower Bosphorus currents obtained using altimetry data on the Black Sea level and also the data of coast stations are compared. Previously the average level calculated using data of coast stations located along the coastline of the former Soviet Union, served as the average sea level required for estimating water exchange. It is shown that seasonal and annual variation of increase of the average sea level is qualitatively the same for the data of both types. At the same time the values of seasonal variation amplitudes are significantly different. Application of the increase of the sea average level (altimetry data) results in insignificant change of a yearly water exchange through the Bosphorus as compared to the coastal data. However, there are some differences in the seasonal variation. The authors' opinion is that the proposed algorithm for calculating increase of the sea level reduces the error in calculation of the water balance.