

Е.М.Лемешко, Н.Ф.Кириленко

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ GRACE ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ КОМПОНЕНТ ВОДНОГО БАЛАНСА ВНУТРЕННИХ МОРЕЙ И БАССЕЙНОВ РЕК

Работа посвящена анализу спутниковых данных гравиметрии, полученных в ходе эксперимента *Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)* с целью получения независимых от гидрологических данных оценок водного баланса внутренних морей или бассейнов крупных рек. Для расчета водного баланса, например, Черного моря, необходимо привлекать данные о суммарном стоке рек, осадках и испарении, а также водообмене через проливы. Наиболее достоверной информацией в уравнении водного баланса является сток рек, остальные компоненты водного баланса определяются либо из данных ре-анализа (например, *NCEP, ECMWF*), либо на основе полуэмпирических соотношений. В работе на основе анализа данных *GRACE*, проведено сравнение с компонентами водного баланса Черного моря, и даны рекомендации по корректировке алгоритма расчета испарения. Для бассейнов крупных рек анализ данных *GRACE* позволяет оценить изменчивость влагозапаса бассейна водосбора реки и таким образом улучшить традиционный гидрологический расчет. Такой подход тестировался на примере бассейна Дуная. Результаты работы могут быть использованы в задачах гидрологии суши для улучшения моделей стока рек и понимания механизмов гидрологического цикла водосбора, а также для валидации или корректировки алгоритма расчета водного баланса внутренних морей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *водный баланс, данные гравиметра, влагозапас бассейна водосбора.*

Данные гравиметрии эксперимента *Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)* получены со спутника, высота орбиты которого около 400 км, эксперимент начался в августе 2002 г. и продолжается по настоящее время. Изменения в гравитационном поле Земли, вызванные перераспределением водных масс и обусловленные динамическими процессами в океанах или гидрологическими процессами на суше (изменение массы воды в озерах и бассейнах рек, влагосодержания почвы), пересчитываются в параметр толщины эквивалентного слоя воды, который будет далее использоваться для оценок водного баланса внутренних морей или бассейнов рек [1, 2]. Цель данной работы заключалась в оценке качества данных *GRACE* для дренажного бассейна Черного моря и получения независимых оценок водного баланса моря и влагозапаса бассейна реки Дунай.

Измерения гравитационного поля со спутника раскладываются по сферическим функциям и производится фильтрация данных с тем, чтобы оставить сигнал, связанный с перераспределением вод суши и изменением водных масс океана, подробное изложение процесса обработки исходной информации *GRACE* изложено в [1, 2]. В результате получают ряды эквивалентной толщины водного слоя в узлах регулярной сетки $1^\circ \times 1^\circ$ и интервалом по времени в 1 месяц.

Бассейны водосбора Средиземного и Черного морей занимают большую часть Европы и включают в себя бассейны крупных рек. Из-за достаточно грубого пространственного разрешения сетки $1^\circ \times 1^\circ$, а также из-за того, что изменчивость влагозапаса суши значительно превосходит по величине вариации водных масс внутренних морей, возникает необходимость пространственной фильтрации данных с тем, чтобы устранить подсеточный эффект просачивания сигнала вод суши. Для этого использовался гауссовый фильтр с различным пространственным радиусом корреляции. В качестве тестового гидрологического бассейна нами использовался водосбор реки Дунай, так как для него достаточно хорошо известны величины речного стока, осадков и испарения. Результаты приведены на рис.1.

Как видно, разница между нефiltroванными данными (параметр фильтра $r = 0$ км) и фильтованными (например, с параметром фильтра $r = 500$ км) могут достигать 40 мм (рис.1). При этом характер временной изменчивости (амплитуда, фаза сигнала) сохраняется. Кроме того, оценивалась величина среднеквадратичных отклонений (ско) фильтованного сигнала от величины параметра фильтра: при $r = 300$ км, ско составило 23 мм; при $r = 500$, ско 17 мм; при $r = 750$, ско достигло 14 мм, то есть среднеквадратичное отклонение уменьшалось при увеличении параметра r .

Для независимого оценивания компонент гидрологического баланса бассейна Дуная нами использовались данные ре-анализа модели гидрологии суши *NOAH* [3], которые подвергались аналогичным процедурам фильтрации. Сравнение данных *GRACE* и влагозапаса суши W по данным модели *NOAH*, осредненные по площади бассейна реки Дунай, приведено на рис.2. Амплитуда и фаза данных модели хорошо соответствует данным *GRACE* за

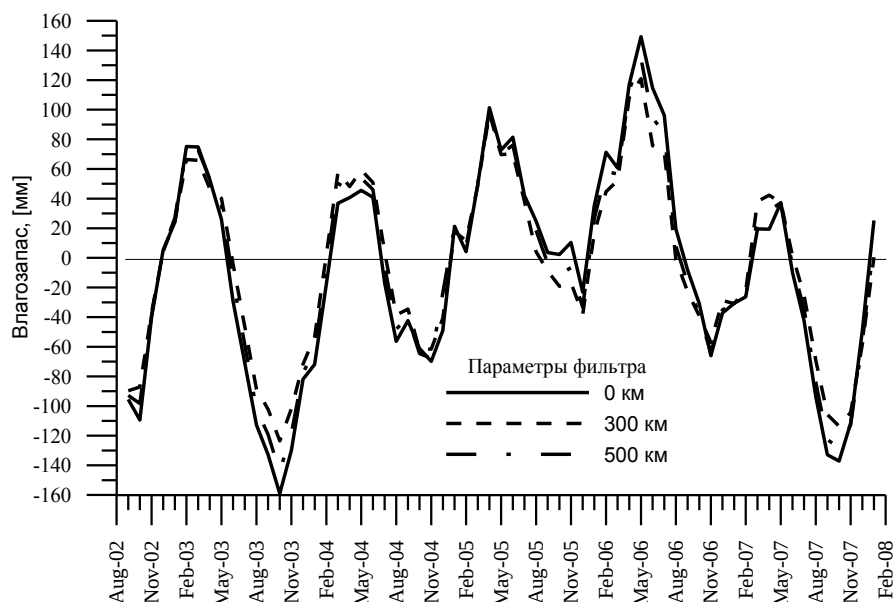
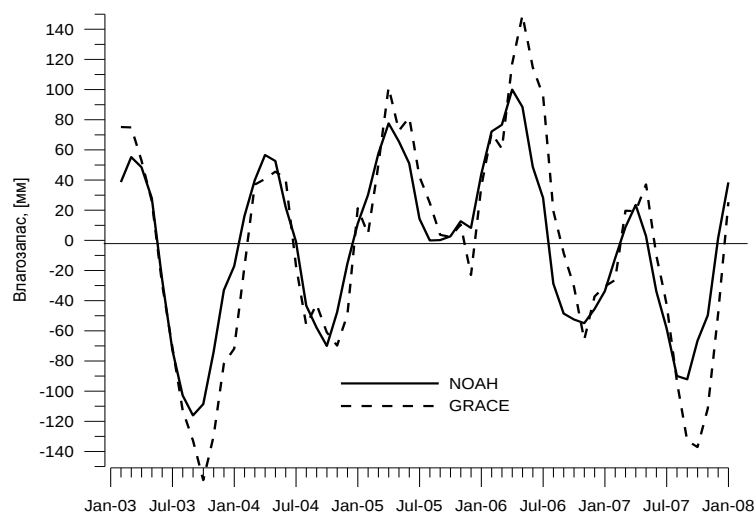


Рис. 1. Аномалии толщины эквивалентного слоя воды (с параметрами фильтра $r = 0; 300; 500$ км) по данным *GRACE*, осредненные по площади водосборного бассейна реки Дунай.



Р и с . 2 . Аномалии толщины эквивалентного слоя воды (параметр фильтра $r = 0$ км) по данным *GRACE* и изменения влагозапаса верхнего слоя почвы в 1 м (с учетом вклада снежного покрова) по данным модели *NOAH*, осредненные по площади водосборного бассейна реки Дунай.

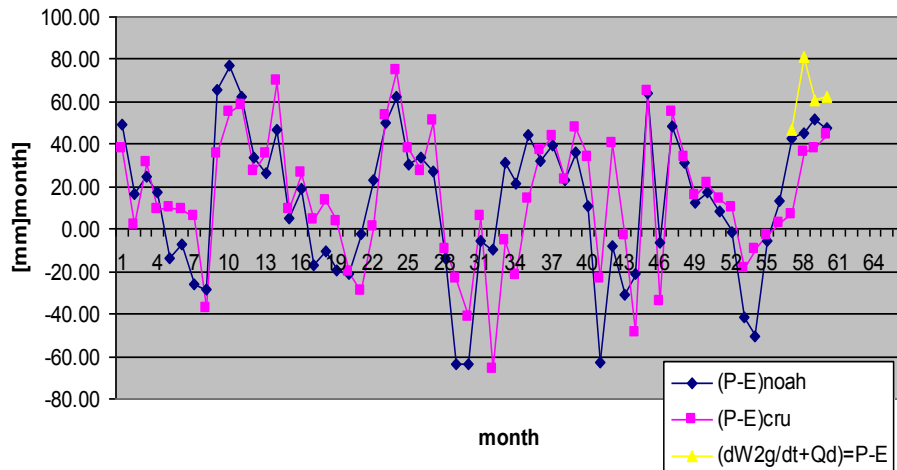
период 2003 – 2007 гг., систематическое занижение амплитуды сигнала модели на 10 – 30 мм объясняется тем, что на графике приведены нефiltroванные данные (параметр фильтра $r = 0$ км) и тем, что модель *NOAH* дает изменения влагозапаса только верхнего слоя почвы толщиной только 1 м с учетом вклада снежного покрова в зимний период. Данные модели демонстрируют достаточно хорошее соответствие с гидрологической информацией о стоке реки для различных водосборных бассейнов [3], это дает основание полагать, что данные *GRACE* пригодны для анализа изменчивости вод суши для водосборного бассейна Черного моря и для дренажных бассейнов крупных рек. Для бассейна реки Дунай эти данные пригодны для изучения сезонных и межгодовых процессов (рис.2).

Представляет интерес сравнить также данные *GRACE* и модели *NOAH* с учетом гидрологических измерений о стоке реки Дунай за период 2003 – 2007 гг. Для этого используем уравнение водного баланса в виде (1).

$$P = \frac{\partial W}{\partial t} + E + Q, \quad (1)$$

где P – осадки над площадью водосбора реки, Q – объем стока реки, E – суммарное поверхностное испарение (почва, растительность), W – влагозапас почвы.

Наиболее достоверная информация имеется только для стока реки Q , поскольку она основана на прямых измерениях уровня реки с последующим пересчетом в расход воды по соответствующим методикам. Измерения влагозапаса почвы W – очень трудоемкая процедура, имеется очень ограниченное число данных прямых измерений, которые не являются репрезентативными для всего бассейна Дуная. Однако в качестве W можно использовать



Р и с . 3. Сравнение хода элементов водного баланса бассейна реки Дуная ($P - E$) по данным ре-анализа *CRU* и модели *NOAH* за период 2003 – 2007 гг.

измерения *GRACE*. Осадки над всей площадью водосбора P можно оценить на основе данных ре-анализа наблюдений осадков на метеорологических станциях, например, по массиву данных *CRU* [4]. В этой работе проанализировано качество данных *CRU*, и сделан вывод о пригодности этой информации для воднобалансовых оценок для бассейна реки Дунай. Наиболее неопределенным членом уравнения водного баланса является суммарное испарение E – испарение с поверхности водоемов и почвы с учетом испарения влаги растительностью. Существует несколько методов расчета суммарного испарения E , они также обсуждаются в [4]. В качестве примера для бассейна реки Дунай на рис.3 дано сравнение хода элементов водного баланса ($P - E$) по данным ре-анализа *CRU* и модели *NOAH* за период 2003 – 2007 гг.

Как видно, временной ход разницы осадков и испарения ($P - E$), осредненной по всему водосборному бассейну реки Дунай, в целом совпадает, хотя расхождения по величине могут достигать 20 мм/мес. Если перегруппировать уравнение (1) в виде (2), то в левой части находятся члены, которые оцениваются по данным ре-анализа, а в правой – члены, которые рассчитываются на основе измерений.

$$P - E = Q + \frac{\partial W}{\partial t}. \quad (2)$$

Сравнение временного хода элементов водного баланса бассейна реки Дунай, рассчитываемых по данным гидрологического ре-анализа ($P - E$) модели *NOAH* и по данным измерений стока Q и изменений влагозапаса по данным *GRACE* (правая часть (2)) за период 2003 – 2007 гг. приведены на рис.4. Временной ход компонентов баланса в целом также совпадает и одинаково описывает особенности как внутрисезонной, так и межгодовой изменчивости, однако максимальные отличия по величине достигают в отдельные месяцы 30 мм/мес. Тем не менее, эти отличия в основном обусловлены скорее менее точной оценки разности ($P - E$), чем ошибками в расчетах правого члена уравнения (2), это видно из сопоставления графиков на рис.3 и 4.

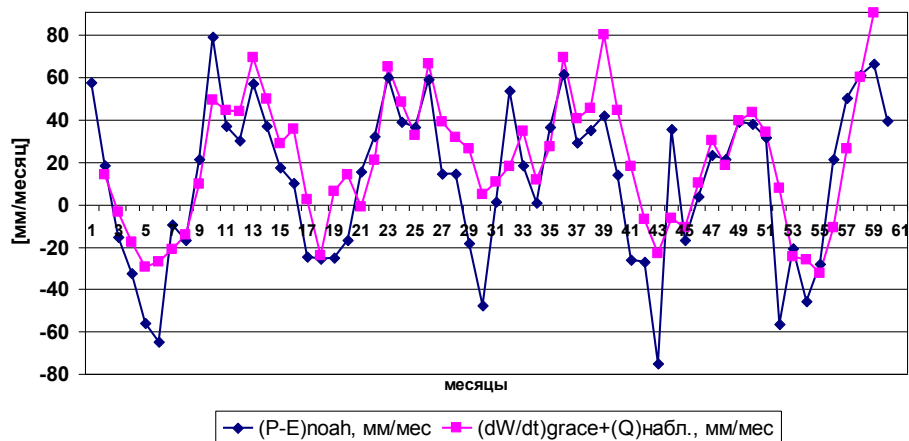


Рис. 4. Сравнение временного хода элементов водного баланса бассейна Дуная, рассчитываемых по данным гидрологического ре-анализа ($P - E$) и по данным измерений за период 2003 – 2007 гг.

Оценивание водного баланса Черного моря представляет собой более трудную задачу, так как в уравнение баланса добавляется член, описывающий результирующий водообмен через проливы Черного моря, который оценивается на основании полуэмпирических соотношений:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P - E - Q \pm Q_s. \quad (3)$$

где P – осадки над акваторией моря, Q – суммарный объем речного стока, E – суммарное испарение, W – водный баланс моря, $\pm Q_s$ – результирующий водообмен через проливы.

Операция пространственной фильтрации с различными параметрами фильтра g также применялась к данным *GRACE* для акватории Черного моря, чтобы устранить просачивание сигнала, связанного с влагозапасом суши, окружающей море, результаты аналогичны приведенным на рис. 1.

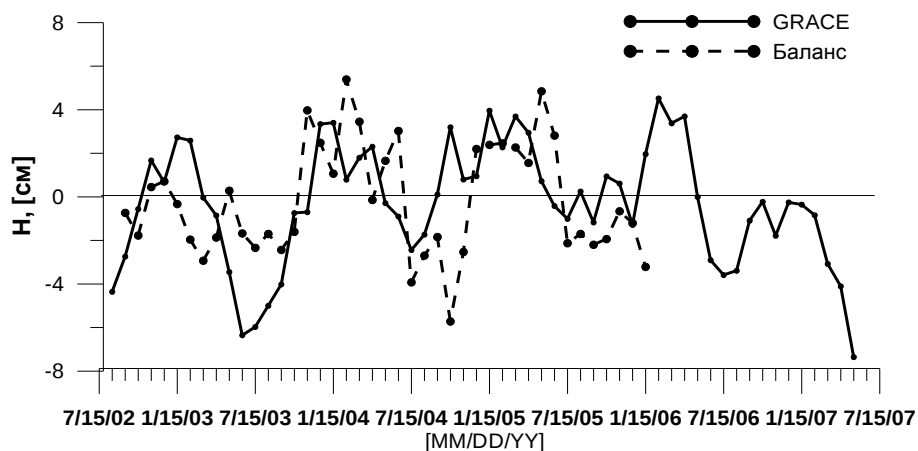


Рис. 5. Баланс Черного моря по данным гидрологических наблюдений и *GRACE* (параметр фильтра $r = 0$ км).

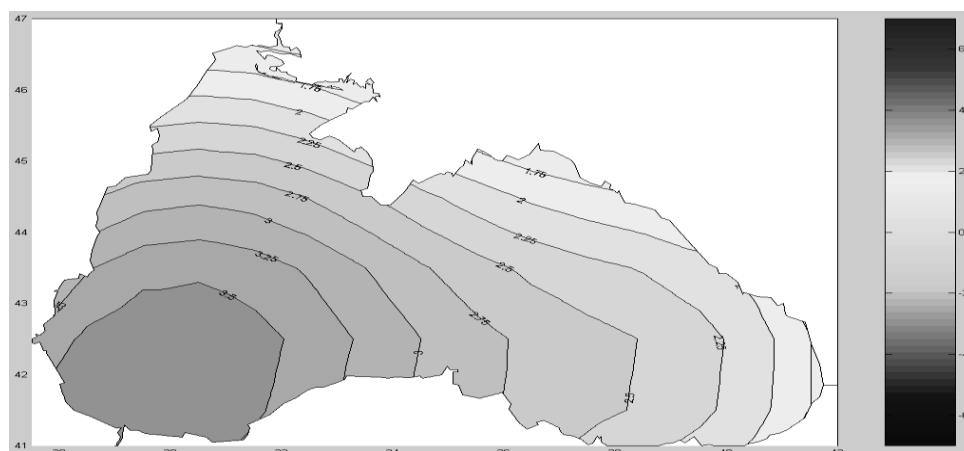


Рис. 6. Толщина эквивалентного слоя воды для Черного моря за январь 2003 г. (в [см]).

На рис.5 приведен результирующий график водного баланса Черного моря по данным *GRACE* за 2003 – 2007 гг. и баланса, рассчитанного на основе наблюдений за 2003 – 2005 гг., любезно предоставленного Морским отделением УкрНИГМИ. В первом приближении оба графика имеют общие тенденции временной изменчивости и примерно одинаковую амплитуду величин баланса (рис.5), что в целом указывает на пригодность использования данных *GRACE* для оценивания водного баланса моря. Видимо, необходимы более тщательная фильтрация просачивания сигнала влагозапаса суши от прибрежных узлов сетки *GRACE*, анализ данных различных продуктов ре-анализа для осадков и испарения над Черным морем, и лучшая параметризация водообмена через проливы.

Тем не менее, уже на данном этапе использование данных *GRACE* в сочетании с альтиметрической информацией, данными буев-профиломеров *ARGO* может быть полезным, например, при оценивании вклада стерического эффекта в изменение уровня моря и величины водообмена через проливы. На рис.6 приведена карта распределения аномалий толщины эквивалентного слоя воды для Черного моря за январь 2003 г., как видно, область максимальных значений с величинами более 3,5 см находится в прибухорском районе и характеризует изменения массы черноморских вод, обусловленной водообменом через пролив.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chambers D.P.* Observing seasonal steric sea level variations with *GRACE* and satellite altimetry // *J. Geophys. Res.*– 2006.– 111, C3.– C03010, 10.1029/2005JC002914.
2. *Wahr J., Molenaar M., Bryan F.* Time-variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using *GRACE* // *J. Geophys. Res.*– 1998.– 103.– P.32205-30229.
3. *Ek M.B., Mitchell K.E., Lin Y., Rogers E., Grunmann P., Koren V., Gayno G., Tarpley J.D.* Implementation of the upgraded Noah land-surface model in the NCEP

operational mesoscale Eta model // J. Geophys. Res.– 2003.– 108, D22.– 8851.– doi: 10.1029/2002JD003296.

4. Лемешко Е.М., Кириленко Н.Ф., Лемешко Е.Е. Моделирование многолетнего стока реки по данным ре-анализа: пример бассейна Дуная за 1901 – 2002 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.19.– С.234-243.

Материал поступил в редакцию 12.11.2010 г.