

# ВОЗМОЖНОСТИ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ НЕЗАВИСИМОГО ОЦЕНИВАНИЯ КОМПОНЕНТ ВОДНОГО БАЛАНСА ВНУТРЕННИХ МОРЕЙ И БАССЕЙНОВ РЕК

*E.M. Lemeshko*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины,  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
*E-mail: Evgeny.Lem@gmail.com*

*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. Показана возможность использования данных GRACE для бассейнов крупных рек, что позволяет оценить изменчивость влагозапаса бассейна водосбора реки и таким образом улучшить традиционный гидрологический расчет. Результаты работы могут быть использованы в задачах гидрологии суши для улучшения моделей стока рек и понимания механизмов гидрологического цикла водосбора.*

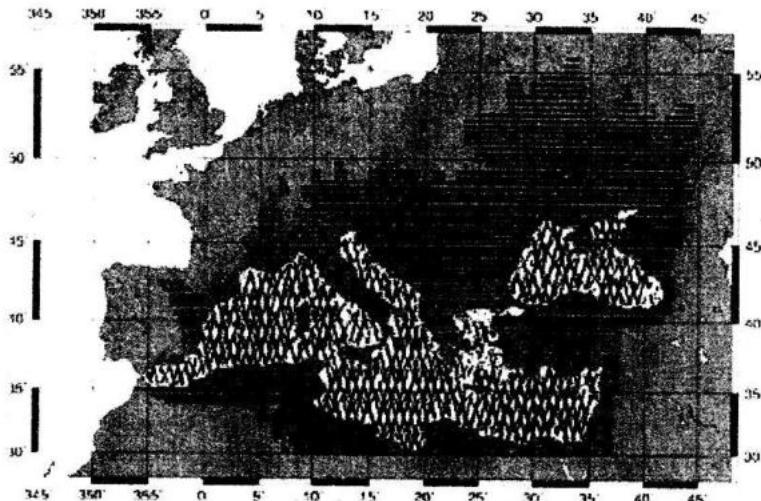
Данные гравиметрии эксперимента Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) получены со спутника, высота орбиты которого около 400 км, эксперимент начался в августе 2002 г. и продолжается по настоящее время. Изменения в гравитационном поле Земли, вызванные перераспределением водных масс и обусловленные 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 водно-

го баланса моря и влагозапаса бассейна реки Дунай.

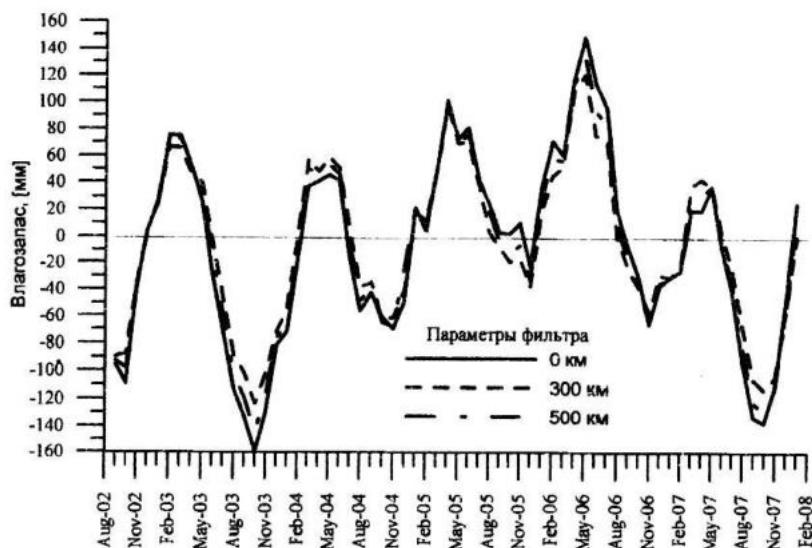
Измерения гравитационного поля со спутника раскладываются по сферическим функциям и производится фильтрация данных с тем, чтобы оставить сигнал, связанный с перераспределением вод суши и изменением водных масс океана, подробное изложение процесса обработки исходной информации GRACE изложено в [1, 2]. В результате получаются 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 (рис. 1). 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 гауссовский фильтр с различным пространственным радиусом корреляции. В качестве тестового гидрологического бассейна нами использовался водосбор реки Дунай, так для него достаточно хорошо известны величины речного стока, осадков и испарения. Результаты приведены на рис. 2.

Как видно, разница между нефильтрованными данными (параметр фильтра  $r = 0$  км) и фильтрованными (например, с параметром фильтра  $r = 500$  км) могут достигать 40 мм (рис. 2). При этом характер временной изменчивости (амплитуда, фаза сигнала) сохраняется. Кроме того, оценивалась величина среднеквадратичных отклонений (СКО) фильтрованного 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  $r$ .



Р и с. 1. Дренажный бассейн Средиземного и Черного морей



Р и с. 2. Аномалии толщины эквивалентного слоя воды (с параметрами фильтра  $r = 0, 300, 500$  км) по данным GRACE, осредненные по площади водосборного бассейна реки Дунай

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. 3. Амплитуда и фаза данных модели хорошо соответствуют данным GRACE за период 2003 – 2007 гг., систематическое занижение амплитуды сигнала модели на 10 – 30 мм объясняется тем, что на графике приведены нефильтрованные 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 межгодичных процессов (рис. 3).

метр 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 межгодичных процессов (рис. 3).

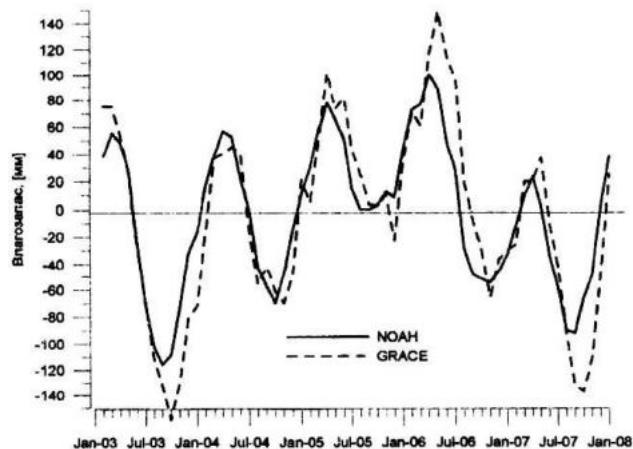


Рис. 3. Аномалии толщины эквивалентного слоя воды (параметр фильтра  $r = 0$  км) по данным GRACE и изменения влагозапаса верхнего слоя почвы в 1 м (с учетом вклада снежного покрова) по данным модели NOAH, осредненные по площади водосборного бассейна реки Дунай

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

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

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 представительными для всего

бассейна Дуная. Однако в качестве  $W$  можно использовать 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 водобалансовых 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. 4 дано сравнение хода элементов водного баланса ( $P-E$ ) по данным ре-анализа CRU и модели NOAH за период 2003 – 2007 гг.

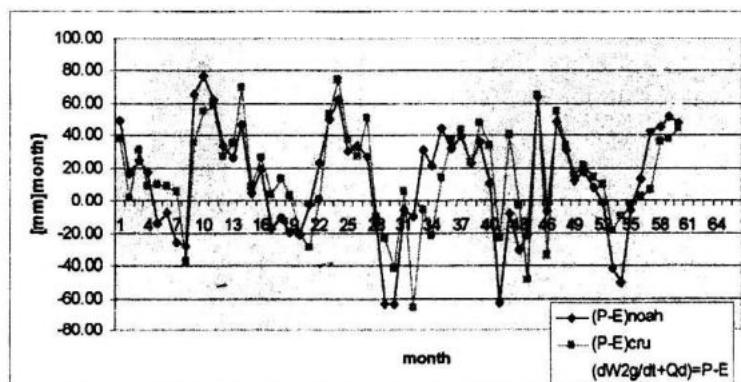


Рис. 4. Сравнение хода элементов водного баланса бассейна реки Дунай ( $P-E$ ) по данным ре-анализа CRU и модели NOAH за период 2003 – 2007 гг.

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/месяц. 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. 5.

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. 4 и рис. 5.

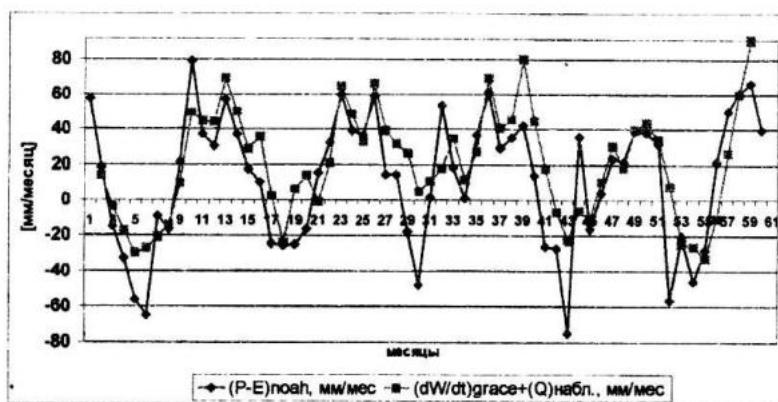


Рис. 5. Сравнение временного хода элементов водного баланса бассейна Дуная, рассчитываемых по данным гидрологического ре-анализа ( $P-E$ ) и по данным измерений за период 2003 – 2007 гг.

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  $\tau$  также применялась к данным GRACE для акватории Черного моря, чтобы устранить просачивание сигнала, связанного с влагозапасом суши, окру-

жающей море, результаты аналогичны приведенным на рис. 2.

На рис. 6 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 УкрНИИГМИ. В первом приближении оба графика имеют общие тенденции временной изменчивости и примерно одинаковую амплитуду величин баланса (рис. 6), 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 водобмена через проливы.

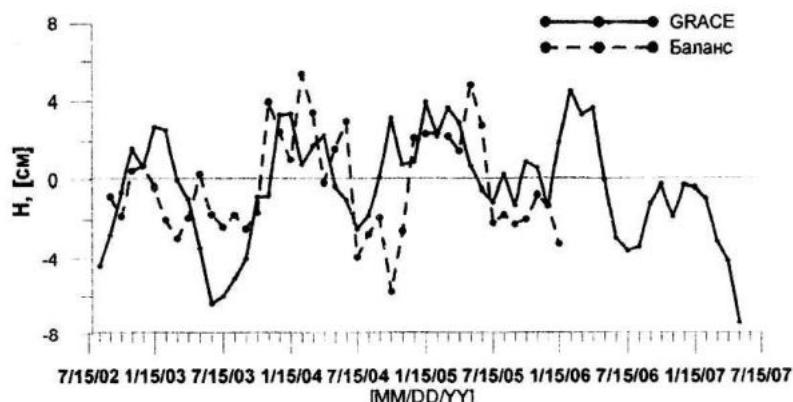


Рис. 6. Баланс Черного моря по данным гидрологических наблюдений и GRACE (параметр фильтра  $r = 0$  км)

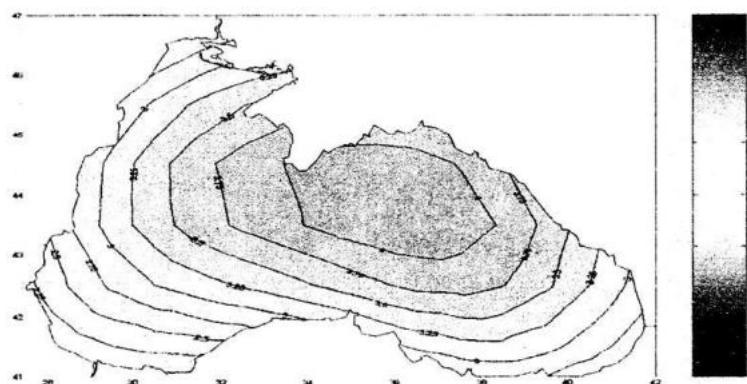


Рис. 7. Толщина эквивалентного слоя воды (в см) для Черного моря за март 2006 г.

Тем не менее, уже на данном этапе использование данных GRACE в сочетании с альtimетрической информацией, данными буев-профилемеров ARGO может быть полезным, например, при оценивании вклада стерического эффекта в изменение уровня моря и величины водообмена через проливы. На рис. 7 в качестве примера приведена карта распределения аномалий толщины эквивалентного слоя воды для Черного моря за март 2006 г., область максимальных значений с величинами более 3,5 см находится в центральной части моря.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chambers, D. P.: Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry // J. Geophys. Res., 2006, 111 (C3), C03010, doi: 10.1029/2005JC002914.
- Wahr, J., M. Molenaar, and F. Bryan, Time-variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE // J. Geophys. Res., 103, 32,205–30,229, 1998.
- Ek, M. B., K. E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno, and J. D. Tarpley Implementation of the upgraded Noah land-surface model in the NCEP operational meso-scale Eta model. // J. Geophys. Res., 2003, 108 (D22), 8851, doi: 10.1029/2002JD003296.
- Лемешко Е.М., Кириленко Н.Ф., Лемешко Е.Е. Моделирование многолетнего стока реки по данным реанализа: 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.