

УДК 528.88, 556.042

## ИЗМЕНЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ В БАССЕЙНАХ КРУПНЫХ РЕК РОССИИ ПО ДАННЫМ GRACE

**Л.В. Зотов, Н.Л. Фролова, А.А. Телегина***МИЭМ ВШЭ, ГАИШ МГУ, email: wolftempus@gmail.com**Географический факультет МГУ, email: Frolova\_nl@mail.ru**ИВП РАН, email: annatelegina29@yandex.ru*

*Спутники-близнецы GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) позволяют изучать аномалии распределения масс на основе данных по гравитационному полю Земли, получаемых ежемесячно с 2002 г. в виде коэффициентов Стокса разложения гравитационного потенциала. Временные вариации глобального гравитационного поля, измеряемые GRACE, привели к революции в гидрологии речных бассейнов благодаря тому, что гравитационное поле отражает перераспределения поверхностной и почвенной влаги, таяние льдов, выпадение осадков и испарение на больших территориях. Однако для использования данных GRACE необходима фильтрация шумов. Мы применяем многоканальный сингулярный спектральный анализ (МССА) для фильтрации данных GRACE и разделения главных компонент (ГК) с разными периодами. Усреднение данных по бассейнам пятнадцати крупнейших рек России показало, что весна 2013 года отличалась экстремальным снегонакоплением, а лето и осень 2014 были довольно сухими. Максимумы и минимумы, связанные с паводками на Амуре в 2013 г, засухой в бассейне Волги в 2010 г. и др., хорошо видны в наблюдениях GRACE и могут быть сопоставлены с данными гидрологических станций и гидрологическими моделями, такими как Global Land Data Assimilation System (GLDAS) или WaterGAP Global Hydrology Model (WGHM). Долгопериодические изменения, связанные с климатическими изменениями, отделены в ГК 2. Они показывают увеличение масс в районах вечной мерзлоты Сибири и уменьшение над Каспием.*

*Ключевые слова: гравитационное поле, GRACE, космическая гравиметрия, МССА, речной сток, влагозапас.*

### Введение

Космические средства наблюдений в последние десятилетия внесли существенный вклад в научные исследования. Большой объем данных дистанционного зондирования Земли позволил научному сообществу продвинуться в исследованиях изменений климата. Суммарный эффект от перераспределения масс в оболочках Земли приводит к изменениям гравитационного поля. Гравиметрия – наука с давней историей. Методы гравиметрических измерений совершенствовались на протяжении всего XX века. Но лишь космическая эра открыла путь к полномасштабному исследованию глобального гравитационного поля планеты, в том числе на труднодоступных протяженных территориях.

Технологическое достижение нашей эпохи – спутники-близнецы GRACE (NASA/DLR Gravity Recovery And Climate Experiment) были запущены с космодрома Плесецк 17.03.2002. Они дают возможность наблюдать ежемесячные изменения гравитационного поля Земли и работают уже в два

раза дольше номинального срока службы. Несмотря на то, что заряд батарей в 10 раз сократился, миссия продлена до 2017 года, когда планируется запуск следующей подобной миссии GRACE Followon Mission. За приоритет в запуске такой миссии ведется активная борьба между США, Китаем, Евросоюзом.

Спутники GRACE находятся на околополярной орбите высотой около 500 км, следуя друг за другом на расстоянии - 220 км. Ускорение каждого спутника, возникающее при пролете над аномальными массами, оказывает влияние на дальность между двумя спутниками, которая измеряется микроволновым радаром в К-диапазоне. Эта дальность является исходной величиной, содержащей информацию о гравитационном поле. Центры данных, расположенные в Геофизическом институте GFZ (Потсдам), в Центре космических исследований CSR (Остин) и в Лаборатории реактивного движения JPL (Пасадена) обрабатывают эти данные, принимая к учету показания набортных GPS, акселерометров, звездных камер, и др., получая продукт первого уровня (L1) [1]. Затем, с использованием сложного алгоритма решения обратной задачи с регуляризацией [2–3], внося поправки на эффект наложения частот от изменений атмосферного давления над сушей и океаном, поправки на твердотельный, океанический и полярный прилив и др., получают данные второго уровня (L2) [4], представляющие собой разложение ежемесячного гравитационного поля по коэффициентам Стокса (1) на сфере со средним радиусом Земли [5–6].

Получение усредненного гравитационного поля (геоида) и его модели является основной целью космических гравиметрических миссий [7, 36]. Современные модели включают измерения, полученные на спутниках CHAMP (CHallenging Minisatellite Payload), GRACE и GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer). Однако GRACE также предоставляет ежемесячные аномалии (один месяц требуется для покрытия всей Земли). При вычитании среднего поля из ежемесячных коэффициентов Стокса, получаемых с GRACE, можно наблюдать изменения от месяца к месяцу с точностью до микроГала ( $1 \text{ Гал} = 0.01 \text{ м/с}^2$ ) и пространственным разрешением около 300 км. Ежемесячные файлы данных уровня L2 доступны на серверах GFZ, CSR, и JPL, но для их использования необходима фильтрация меридиональных коррелированных шумов, называемых полосами, или страйпами. Их причиной являются полярные орбиты обоих спутников, недостаточно хорошее отражение гравитационного сигнала и др. Научные группы работают над созданием оптимальных алгоритмов фильтрации этих шумов в данных GRACE.

Данные GRACE могут использоваться в геофизических, геологических, океанографических и гидрологических исследованиях. Исследования по вращению Земли, геодинамике, сейсмологии и климатологии также существенно выигрывают от этой миссии. Широкий спектр связанных с

---

*Альманах современной метрологии, 2015, №3*

GRACE научных вопросов и приложений ежегодно публикуется в научных журналах и обсуждается на международных ассамблеях.

Для самой большой страны в мире России, недостаточно покрытой метеорологическими и гидрологическими сетями наблюдений, данные космической гравиметрии особенно полезны. К весне 2013 г. стало ясно, что Россия претерпевает очень снежную зиму. В окрестностях Москвы снежный покров превышал 70 см. Возник вопрос, может ли это отразиться в данных GRACE?

В данной работе мы представим результаты исследования изменений гравитационного поля над территорией России по данным GRACE. Новый метод обработки данных – многоканальный сингулярный спектральный анализ (МССА) применяется нами для фильтрации данных GRACE и улучшения разделимости между компонентами сигнала, связанными с гидрологическими сезонными и климатическими изменениями. Метод и исходные данные представлены в следующем разделе, результаты обработки – в разделе 3, далее следуют дискуссия и заключение.

## 1. Обработка данных

### 1.1 Подготовка исходных данных

Мы использовали данные GRACE JPL второго уровня L2 релиз RL0501 в виде ежемесячных коэффициентов Стокса с 01.2003 по 11.2014, набор коэффициентов полон до 60-й степени и порядка. Релиз 5 (RL05-01) данных L2 более точен, чем предыдущие версии (RL04) в основном благодаря уточненной модели. Десять месяцев пропущенных данных (06.03, 01.11, 06.11, 05.12, 10.12, 03.13, 08.13, 09.13, 02.14, 07.14) были линейно проинтерполированы (всего  $N = 143$  файла использовано). Отсутствие некоторых из месячных решений связано с поддержанием режима заряда батареи при заходе спутников в тень и др.

Разложение гравитационного поля по сферическим функциям дается выражением

$$V(\varphi, \lambda, r) = \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=2}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi). \quad (1)$$

Здесь  $C_{nm}$ ,  $S_{nm}$  – нормализованные коэффициенты Стокса, дающие разложение внешнего геопотенциала по сферическим гармоникам,  $n$  – степень,  $m$  – порядок сферической гармоники,  $P_{nm}$  – полностью нормализованные ассоциированные полиномы Лежандра,  $a$  – средний экваториальный радиус Земли, аргументы  $\varphi$ ,  $\lambda$ ,  $r$  соответствуют широте, долготе и радиусу [5].

Коэффициенты нулевой и первой степени обнуляются благодаря выбору системы координат. GRACE нечувствителен к коэффициентам первой степени (геоцентру). Оценки коэффициентов  $C_{20}$  (сжатия) по GRACE не слишком достоверны, поэтому их заменяют решением, полученным по лазерной локации спутников ЛЛС. Поскольку нас интересуют месячные

изменения, среднее поле за 12 лет вычтено из коэффициентов Стокса. Эффект послеледникового поднятия GIA, связанный с восстановлением изостатического равновесия в районе присутствовавших 20000 лет назад ледников (Канада, Скандинавия), исправлен по модели Paulson et al. [8]. Итоговые результаты преобразованы в эквивалентный уровень воды (ЭУВ), выраженный в сантиметрах по формуле [9]:

$$\Delta h(\varphi, \lambda, t) = \frac{2\pi a p_{ave}}{3\rho_w} \sum_{n=2}^{60} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} W_n(\Delta C_{nm}(t) \cos m\lambda + \Delta S_{nm}(t) \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi), \quad (2)$$

здесь  $\Delta C_{nm}(t)$ ,  $\Delta S_{nm}(t)$  – изменения нормированных коэффициентов Стокса относительно среднего поля (модели),  $p_{ave}$  и  $\rho_w$  – средние плотности земли и воды,  $k_n$  – нагрузочный коэффициент Лява для степени  $n$ ,  $W_n$  – коэффициент спектрального фильтра. Все коэффициенты фильтрации в выражении (2) устанавливались равными единице, никакой фильтрации, кроме МССА, не выполнялось.

### 1.2 Многоканальный сингулярный спектральный анализ

Фильтрация данных GRACE необходима, поскольку они содержат меридиональные шумы – страйпы. В первом приближении они вызваны тем, что спутники находятся на одинаковых полярных орбитах и измеряют лишь расстояние вдоль нее, что делает обратную задачу восстановления гравитационного поля довольно плохо обусловленной.

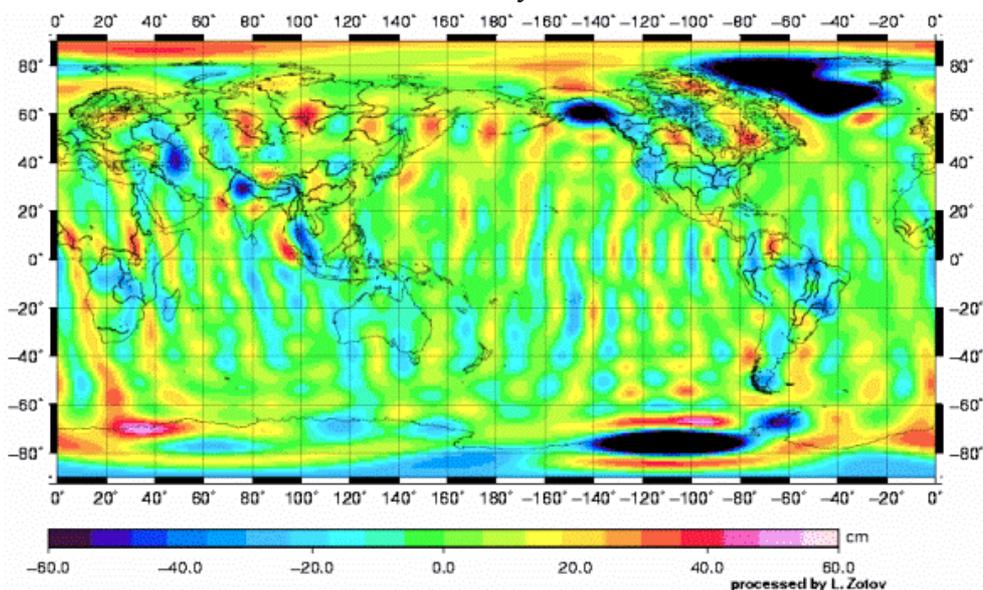


Рис. 1 Нефильтрованные данные GRACE ЭУВ, разность между 11.2014 и 01.2003 (2014-2003). Вертикальные полосы-страйпы искажают сигнал

Орбитальные и инструментальные погрешности коррелированы в резонансных степенях сферических гармоник и их коэффициентов Стокса, что является причиной высокочастотных пространственных шумов страйпов. Разность между 2014 и 2003 гг. для нефильтрованных данных показана на рис. 1.

Разные авторы предлагают использовать всевозможные методы фильтрации для удаления страйпов и минимизации шумов в ежемесячных решениях GRACE. Среди них – гауссовская фильтрация с симметричным и асимметричным ядром [10], фильтры Винера [11] и регуляризирующие фильтры [12], коэффициенты которых зависят от степени и порядка, дестрайпинговые/сглаживающие фильтры [13–15], предназначенные устранить аномально большие резонансные коэффициенты Стокса.

Методы фильтрации, базирующиеся на методе главных компонент (МГК), эмпирических ортогональных функций (ЭОФ), сингулярном спектральном анализе (ССА), и анализе независимых компоненты (АНК) были также предложены. МГК под названием ЭОФ-анализа применялся к данным GRACE в работах [16–18]. В работе [16] был протестирован ССА. Вращение компонент МГК предложено для улучшения их значимости в [19]. Неизотропный фильтр применен в [10]. Это разновидность нелинейной модификации ЭОФ-анализа для нестационарных временных рядов, где главные компоненты получают вычислением огибающих временных рядов и их ортогонализацией. Хороший обзор методов, основанных на ЭОФ, в применении к данным GRACE, можно найти в [20]. Все эти методы довольно близки к МССА, но последний еще более гибок, несмотря на свою математическую сложность, поэтому ему отдано предпочтение в данном исследовании. Впервые мы применили МССА для фильтрации данных GRACE в [21]. В [22] МССА был также апробирован к региональным данным GRACE, но длина лага  $L$  на то время была еще слишком мала, чтобы хорошо разделить компоненты сигнала. Здесь мы продемонстрируем возможности метода в применении к данным GRACE 12-летней протяженности. Многоканальный сингулярный спектральный анализ, также называемый расширенным ЭОФ, является обобщением сингулярного спектрального анализа ССА для многокомпонентных (многоканальных) временных рядов [23–24, 29]. ССА, в свою очередь, основан на МГК, обобщенном для временных рядов таким образом, что вместо обычной корреляционной матрицы анализируется траекторная матрица. Ее получают вложением временного ряда в пространство размерности  $L$ . Параметр  $L$  именуют лагом, или длиной “гусеницы”. При  $L = 1$  ССА вырождается в МГК (траекторная матрица без задержки (лага) становится ковариационной матрицей). Алгоритм ССА включает четыре этапа: а) формирование траекторной матрицы, б) ее разложение по сингулярным числам (SVD), в) группировку сингулярных чисел и г) восстановление главных компонент (ГК) посредством генкелизации.

*Альманах современной метрологии, 2015, №3*

Алгоритм ССА описан детально в [25–26]. МССА содержит ту же последовательность операций.

Вначале (а) мы выбираем параметр задержки  $L$ . Для каждого из коэффициентов Стокса мы располагаем временным рядом длины  $N$ . Для каждого канала временного ряда строится траекторная матрица. Положим, имеется коэффициент Стокса  $C_{ij}(t_k)$ ,  $k = 0, \dots, N-1$ , тогда траекторной матрицей для него будет

$$X_{C_{ij}} = \begin{pmatrix} \Delta C_{ij}(t_0) & \Delta C_{ij}(t_1) & \dots & \Delta C_{ij}(t_{K-1}) \\ \Delta C_{ij}(t_1) & \Delta C_{ij}(t_2) & \dots & \Delta C_{ij}(t_K) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta C_{ij}(t_{L-1}) & \Delta C_{ij}(t_L) & \dots & \Delta C_{ij}(t_{N-1}) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $K = N - L + 1$ .

Все траекторные матрицы  $X_{C_{ij}}$ ,  $X_{S_{ij}}$  для всех коэффициентов Стокса  $C_{ij}$  и  $S_{ij}$  встраиваются в большую блочную матрицу  $X$

$$X = [X_{C_{2,0}}, X_{S_{2,0}}, \dots, X_{C_{ij}}, X_{S_{ij}}, \dots, X_{C_{60,60}}, X_{S_{60,60}}]^T. \quad (4)$$

В нашей реализации мы располагаем блоки один под другим. Эта многокомпонентная траекторная матрица, содержащая блоки для каждого канала, может быть использована для вычисления ковариационной матрицы с задержкой  $A = X^T X$ .

На втором этапе (б) SVD применяется к  $X$   
 $X = USV^T$ .

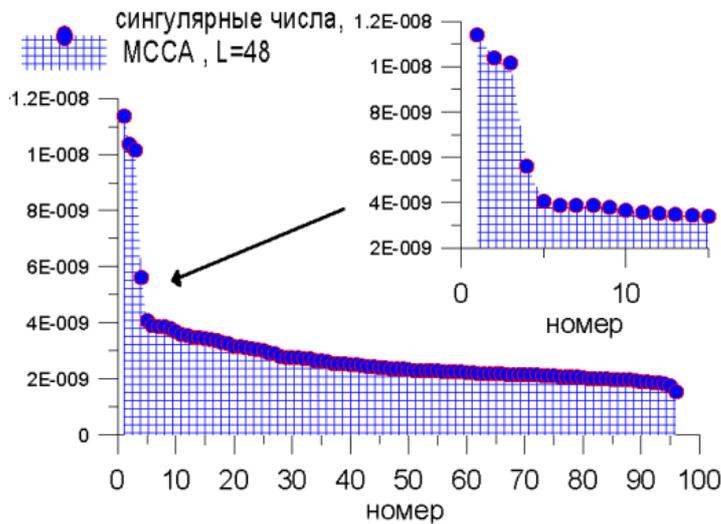


Рис. 2 Распределение сингулярных чисел, определяющих энергию компонент МССА

В результате получают набор сингулярных чисел  $s_i$ , стоящих по диагонали матрицы  $\mathbf{S}$  в порядке убывания (см. рис. 2) и соответствующих им собственным векторам  $\mathbf{v}_i$  (левых) и  $\mathbf{u}_i$  (правых). Если решать задачу на собственные значения для  $\mathbf{A} = \mathbf{V}\mathbf{S}^T\mathbf{S}\mathbf{V}^T$ , тогда собственные значения будут квадратами сингулярных чисел  $\lambda_i = s_i^2$ , а левые собственные вектора  $\mathbf{v}_i$  (столбцы матрицы  $\mathbf{V}$ ) составят базис из эмпирических ортогональных функций (ЭОФ).

Компоненте с номером  $i$  соответствует матрица

$$\mathbf{X}^i = s_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T.$$

В МССА мы восстанавливаем векторную ГК из матрицы, зная ее структуру, соответствующую структуре  $\mathbf{X}$ . Это делается посредством генкелизации (г), позволяющей восстановить каждый канал  $i$ -й ГК из соответствующих блоков матрицы  $\mathbf{X}^i$ , организованной как в (4). Положим, нам требуется восстановить канал  $C_{lm}$ . Тогда каждый  $k$ -й отсчет может быть получен усреднением вдоль побочной диагонали соответствующего блока матрицы  $\mathbf{Y} = \mathbf{X}_{C_{lm}}^i$ . Первые и последние  $L$  элементов ГК вычисляются по меньшему числу значений матрицы  $\mathbf{Y}$ , поэтому соответствующие значения рядов будут менее состоятельными. Считается, что компоненты вдоль боковых диагоналей матрицы  $\mathbf{Y}$  практически совпадают, и матрица почти Генкелева. Когда это строго не выполняется, появляются краевые эффекты.

Группировка (в) компонент необходима, если некоторые из сингулярных чисел связаны с одной и той же ГК и имеют сходное поведение, что можно выявить, вычислив  $w$ -корреляции и другими способами [25]. В таких случаях ( $s_i$ ) должны быть сгруппированы вместе и восстановлены как одна ГК. Это может быть сделано как до, так и после генкелизации (г) простым поэлементным суммированием компонент. Особенности группировки и теоремы о разделимости компонент представлены в [26].

В результате получим набор ГК с убывающими по амплитуде модами изменчивости временных рядов.

Основной параметр алгоритма временной лаг  $L$ , который определяет размерность пространства вложения временного ряда, выбирается эвристически на основе рекомендаций, приведенных в [26]. Он не должен превышать  $N/2$ , и желательно выбирать его так, чтобы ожидаемы во временном ряде периодичности укладывались в лаг целое число раз. В прежних работах мы использовали  $L = 24$  [21,27]. Но с увеличением продолжительности наблюдений, лаг стало можно выбирать в  $L = 48$  месяцев (4 года), что позволяет лучше разделять компоненты. Мы не используем никаких дополнительных фильтров (например, гауссовского), хотя это и возможно, см. выражение (2).

В [21, 27] мы нашли МССА более гибким, чем простой ЭОФ для целей выделения тренда, модулированных по амплитуде колебаний разных периодов, и фильтрации многомерных временных рядов. Различные каналы “помогают” друг другу выделиться, формируются в районы

*Альманах современной метрологии, 2015, №3*

коррелированного пространственно-временного поведения. Матрица  $X$  с лагом позволяет найти их в  $L$ -мерном пространстве. Полученные ГК содержат корреляции, которые одновременно присутствуют во всех каналах, возможно, с фазовой задержкой.

## 2. Результаты обработки

Мы применили МССА в спектральной области к коэффициентам Стокса. Распределение сингулярных чисел (СЧ) показано на рис. 2. Они были сгруппированы в ГК и переведены в пространственные карты ЭУВ. Первые два сингулярных числа объединены в ГК 1, представляющую годовой цикл, следующие два в ГК 2, представляющую тренд (медленные изменения). Сумма МССА-компонент с 1 по 10 (СЧ 1-10) содержит наибольшую часть изменчивости (энергии) сигнала. Сингулярные числа с номерами больше 10 (СЧ > 10) содержат высокочастотную изменчивость, связанную с шумами, страйпами, и некоторую высокочастотную изменчивость сигнала, связанную с транзитными событиями, такими как микросейсмические деформации при землетрясениях. Детальный анализ карт проведен в [21].

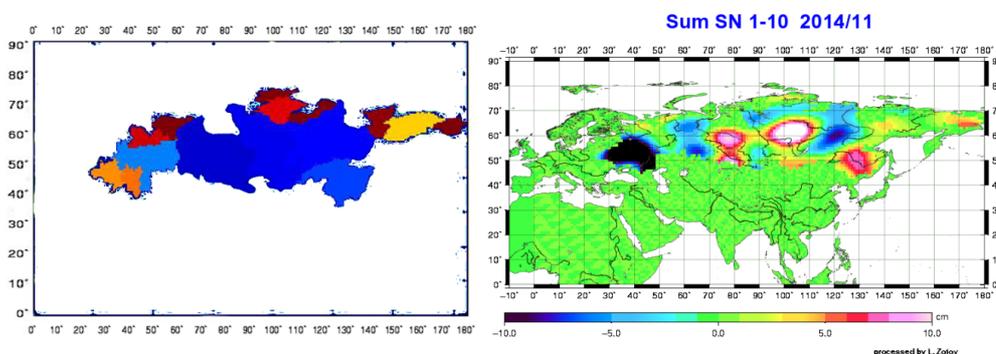


Рис. 3. Бассейны 15 крупнейших рек России и сумма СЧ 1-10 по ним для 11.2014

База данных бассейнов рек Simulated Topological Networks (STN-30p, <http://www.wsag.unh.edu/Stn-30/stn-30.html>) использована для ограничения региона исследований бассейнами 15 крупнейших рек России (рис. 3 слева). В таблице 1 собрана информация по этим бассейнам. Карты суммы СЧ 1-10 для июня 2014 г. в выбранном регионе показана на рис. 3, справа. Эта карта включает вклад от годовой ГК 1, долгопериодической ГК 2 и других компонент, за исключением страйпов, которые, в основном, исключены (отошли к СЧ > 10). Анимированные карты всех полученных компонент доступны в интернете по адресу: <http://lnfm1.sai.msu.ru/~tempus/science/MSSA/index.htm>.

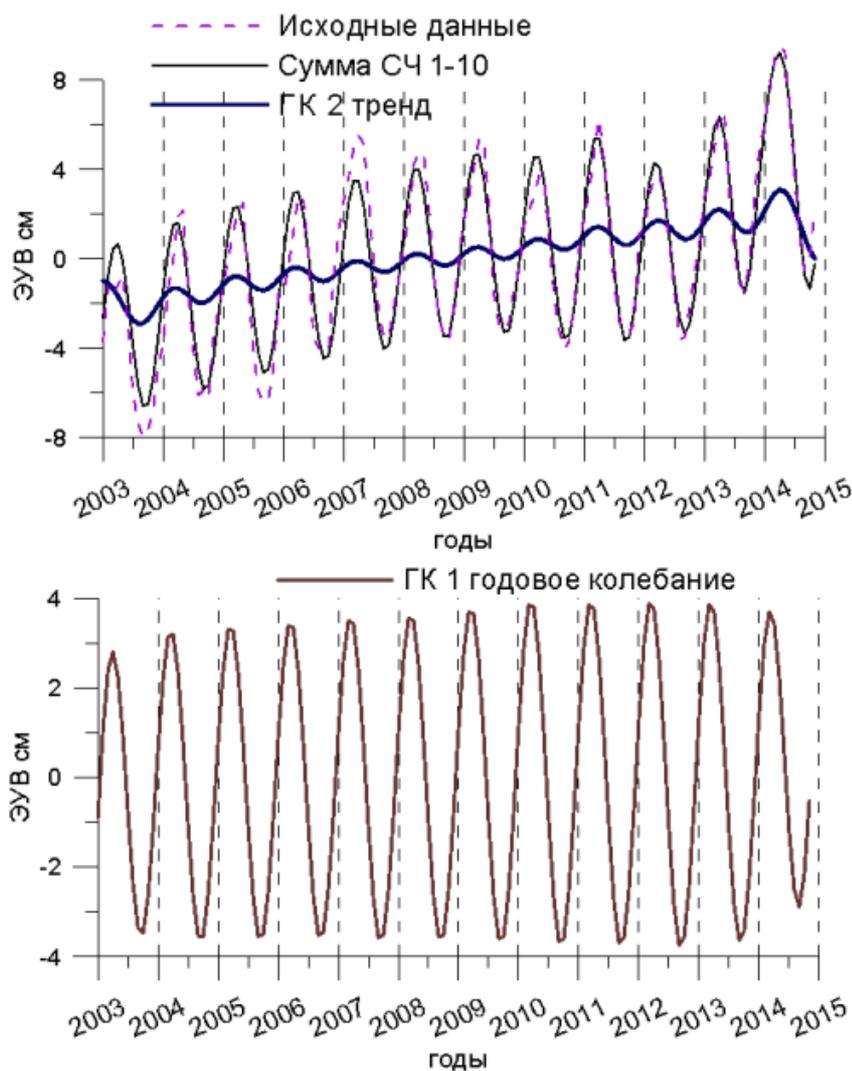


Рис. 4. Усредненные по бассейнам 15 крупнейших рек России изменения масс, сумма СЧ 1-10, тренд ГК 2 (вверху) и годовая компонента РС 1 (внизу)

Сигнал был усреднен над территорией, ограниченной бассейнами 15 крупных рек России. Результаты показаны на рис. 4. На верхнем графике черная кривая иллюстрирует среднюю сумму СЧ 1-10. Фиолетовая кривая показывает исходные данные (сумма всех ГК) до применения МССА. Видно, что сумма СЧ 1-10 включает практически всю изменчивость исходных данных. Тренд (ГК 2) показан синим. В тренде присутствуют небольшие остаточные колебания. В целом он возрастающий, что определяется бассейнами сибирских рек. Мы делали попытки прогноза кривых с использованием нейронной сети [28-29] в 2013 году, когда данные

за весенние месяцы еще не были доступны. Позже, когда они были получены, стало ясно, что прогноз не оправдался (гидрологические факторы не поддаются прогнозу элементарной нейронной сетью).

Рис. 4, внизу, показывает среднее по России только для годового колебания ГК 1. Годовая компонента показывает некоторый рост амплитуды с 2009 г. Часть тренда по краям перетекает в годовое колебание вследствие краевого эффекта.

Карты годовых колебаний ГК 1 показаны на рис. 5 для шести месяцев – февраля, апреля, июня 2013 и июня, августа, октября 2014. Показана вся Евразия; однако наше исследование ограничено территорией России. Видно, что на Европейской части, в Западной Сибири, на Чукотке и Дальнем Востоке запасы воды в снежном покрове весной 2013 года существенно превосходят средние значения. Положительные аномалии растут с февраля, достигают максимума в апреле и идут на убыль в июне.

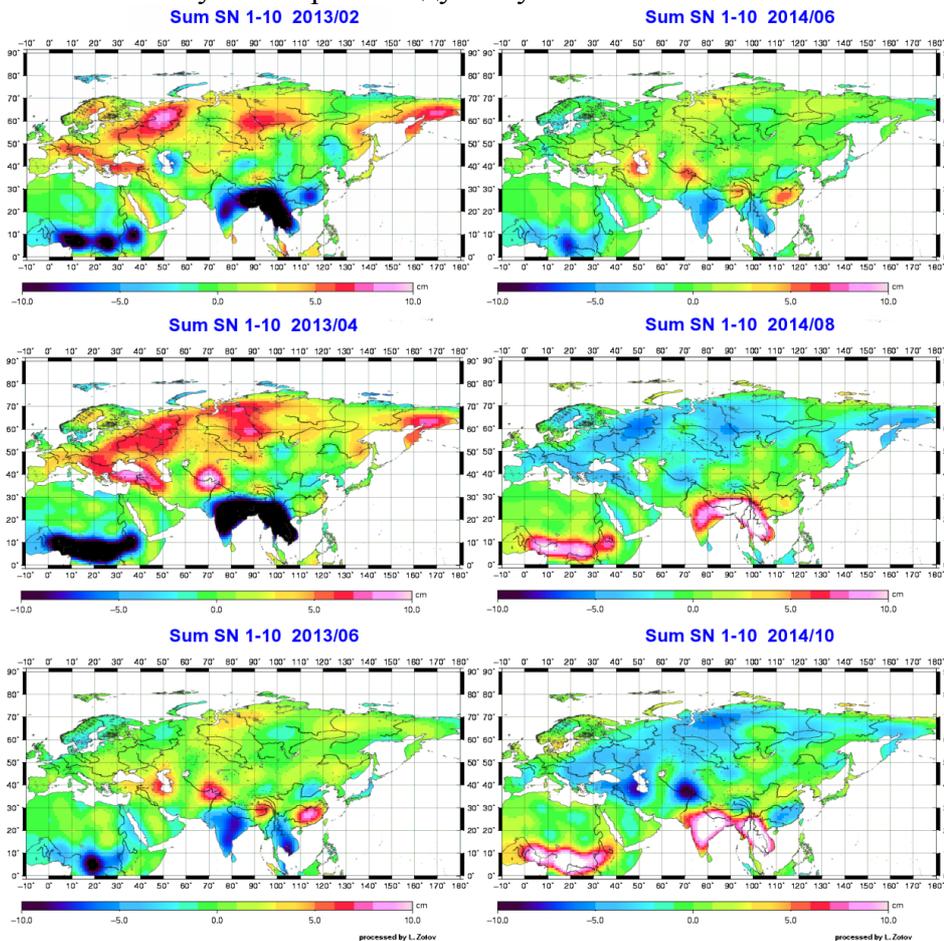


Рис. 5. Ежемесячные карты ГК 1 (годовой цикл) для февраля, апреля, июня 2013 и июня, августа, октября 2014. Виден избыток масс весной 2013 и недостаток осенью 2014

Для климатических условий в пределах территории России характерны отрицательные температуры воздуха, в зимний период большая часть рек покрыта льдом. Приток подземных вод в этот сезон года можно считать постоянным. Исходя из этого можно предположить, что увеличение масс, наблюдаемое с GRACE в зимние месяцы, в основном связано со снегонакоплением. Согласно [30] количество запасенной в снеге воды зимой 2012-2013 гг. было максимальным с 1967 года. Таяние этого снега в апреле-июне вызвало на многих реках Европейской территории России повышенную волну половодья (обеспеченностью около 2% - событие происходящее раз в 50 лет), уровни рек возросли весной на несколько метров, что было зафиксировано измерителями уровня рек Центра регистра и кадастра.

К осени 2014 года сложилась обратная ситуация. В бассейнах многих крупных рек Европейской части, Севера и Сибири количество влаги убывало. Небольшое количество осадков в осенний период привело к пониженным запасам влаги в почве и в руслах рек к началу зимы 2014-2015 гг.

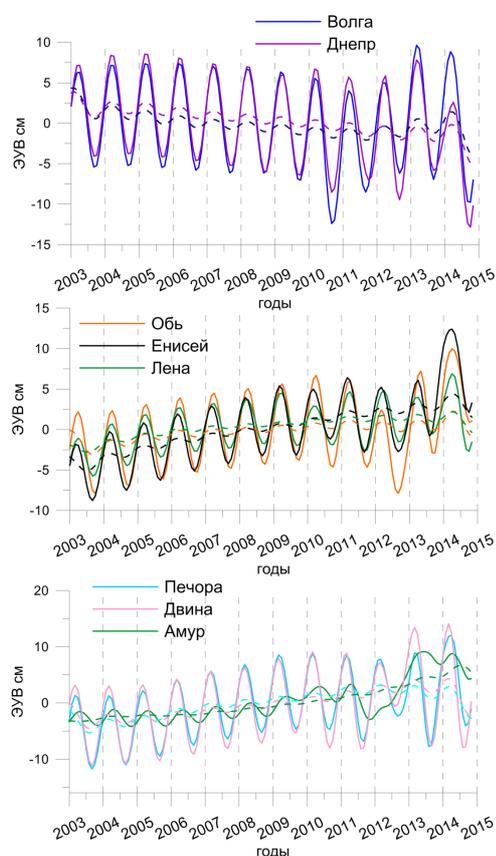


Рис. 6. Среднее изменение масс для бассейнов отдельных рек России. Сумма СЧ 1-10 показана сплошной линией, тренды (ГК 2) – пунктирной

Мы провели усреднение для конкретных бассейнов рек Сибири, Европейской части России, Севера и Дальнего Востока (рис. 6). МССА кривые хорошо согласуются с данными для конкретных бассейнов CNES RL03-v1, доступными на сайте [www.thegraceplotter.com](http://www.thegraceplotter.com). Реки Европейской территории и Сибири различаются по амплитуде сезонных колебаний и направленности трендов общих влагозапасов. Если для европейских рек (рис. 6, сверху) характерны убывающие тренды, то для сибирских рек (рис. 6, центр) - положительные. Поскольку бассейны сибирских рек велики (табл.), они определяют общие тренды массонакопления на всей территории России (ГК 2 на рис. 3, сверху). Сток этих рек во многом определяет и климат арктического региона. Если средние изменения массы умножить на площадь бассейнов, получим полную аномалию запаса влаги.

Таблица

Сводные данные по 15 бассейнам крупнейших рек России, использованных в данном исследовании

Название	Длина бассейна, км	Площадь бассейна, км <sup>2</sup>	Название	Длина бассейна, км	Площадь бассейна, км <sup>2</sup>
Реки арктического бассейна (Азия)			Реки арктического бассейна (Европейская часть)		
Обь	5410	2990000	Северная Двина	1332	357000
Енисей	4102	2580000	Печора	1809	322000
Лена	4260	2490000	Реки тихоокеанского бассейна (Дальний Восток)		
Колыма	2129	647000	Амур	4440	1856000
Хатанга	1636	364000	Реки Европейской части		
Индигирка	1790	362000	Волга	3530	1360000
Анадырь	1150	191000	Днепр	2201	504000
Яна	872	238000	Дон	1870	421700
Оленек	2270	219000			

Кривая изменения аномалий для реки Амур (рис. 6, внизу) отличается тем, что на фоне небольшой годовой амплитуды с 2012 г. наблюдается быстрый прирост масс. Повышенный влагозапас в бассейне Амура после весеннего половодья во многом способствовал развитию катастрофических наводнений после выпадения осадков летом и осенью 2013 г. Исследования показывают [31], что использование данных GRACE способствует увеличению точности прогнозов наводнений и паводков.

Для бассейна Волги можно выделить минимум общих влагозапасов летом 2010 (во время волны жары и лесных пожаров [32]) и 2014 г., связанных с

маловодьем, охватившем весь бассейн (рис. 6, сверху). Подобный минимум наблюдается также осенью 2014 года для бассейна Днепра.

К началу зимы 2014-2015 гг. запас влаги в почве, судя по данным GRACE, оказался меньше среднего. Поэтому для рек европейской части России, Западной Сибири вряд ли стоило ожидать высокого половодья. Как и обещал Росгидромет, оно близко к норме или ниже (<http://www.meteoinfo.ru/hydro-spring>). Впрочем, из рис. 6 видно, что на Енисее и Оби массонакопление (влагозапас) осенью 2014 оказалось немного выше прошлогоднего.

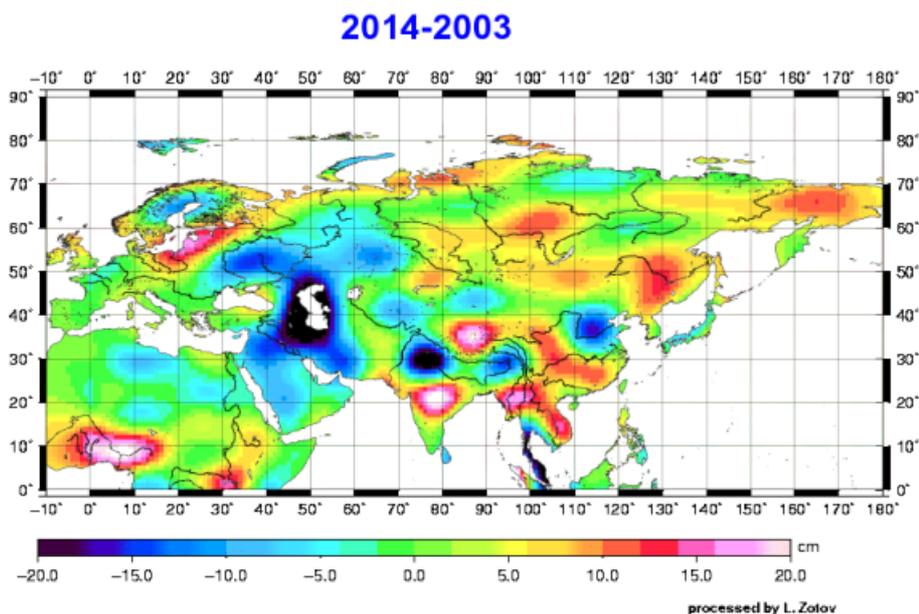


Рис. 7. Разность между 2014 и 2003 годами для компоненты тренда (PC 2)

Рассмотрим карту климатологически-индуцированных трендов, выделенных в ГК 2 на рис. 7. Карта разности между 2014 и 2003 гг. отражает изменения гравитационного поля за 11 лет. Она существенно менее зашумлена, чем карта на рис. 1. Таяние ледников в Гималаях, эффект от Суматранского землетрясения, изменения в Китае, Индии, Африке, хорошо заметные на карте, выходят за пределы нашего рассмотрения. Увеличение массы заметно в некоторых районах Сибири, таких как истоки Лены и Енисея, это может быть связано с деградацией вечной мерзлоты [33, 34]. В результате глобального потепления почвенный лед замещается водой, это увеличивает плотность и, следовательно, массу, что находит отражение в гравитационном поле. Отрицательная аномалия наблюдается над Каспийским морем, вероятно, это связано с уменьшением его уровня [34].

### 3. Заключение и дискуссия

Для столь крупных территорий, как Россия, спутниковая гравиметрия представляет важный канал получения информации, в том числе гидрологической. В данном исследовании ежемесячные данные по гравитационному полю со спутников GRACE были обработаны МССА, переведены в карты эквивалентного уровня воды (ЭУВ) и осреднены в бассейнах 15 крупнейших рек России. Годовая компонента (ГК 1) показывает увеличение амплитуды с 2009 г. (рис. 4, 6). Необычайный максимум весной 2013 г. вызван большим снегонакоплением на территории России (рис. 5, 6). Для рек России в целом характерен возрастающий тренд, обусловленный изменением влагозапасов в первую очередь сибирских рек. Карта тренда (рис. 7) показывает прирост масс в районах Сибири, уменьшение на Каспийском море.

Мы не можем ответить на вопрос, почему зимой 2013 над территория России возросло количество снежных осадков, а в 2014 г. снизилось. Это, может быть, связано с аномалиями переноса масс с Атлантики, циркуляцией течения Гольфстрим, условиями в Арктике, либо состоянием Южного колебания El Nino/La Nina. Существуют также свидетельства паузы в глобальном потеплении (Hiatus). Ответы на все эти вопросы могут быть найдены лишь в рамках междисциплинарных исследований с привлечением данных климатологов, метеорологов и других специалистов. Прогнозы осадков и аномальных температур на будущее могут быть найдены в пятом отчете по климату МГЭИК (IPCC Fifth Assessment Report 2013) или в отчетах Гидрометцентра России [35].

В данной работе мы не планировали найти объяснения метеорологическим и гидрологическим изменениям над территорией России. Нашей целью было представить данные наблюдений и показать их применимость в гидрологии и климатологии, для комплексных исследований нашей планеты.

Мы использовали МССА для фильтрации данных и разделения главных компонент изменчивости. Этот метод может быть полезным для обработки данных GRACE. К примеру, метод коррекции данных GRACE на основе отсечения малых сингулярных чисел уже используется французским космическим агентством CNES для получения собственного продукта уровня L2. МССА имеет большую гибкость, чем простой ЭОФ, и может быть полезен также при анализе спутниковых данных по альтиметрии, концентрации водяных паров в атмосфере, осадкам и др. [27].

Точная физическая интерпретация полученных сигналов требует сравнения с гидрологическими моделями (GLDAS, WGHM) и наземными наблюдениями. Остаются следующие вопросы: какова полезная компонента сигналов ГК 1 и ГК 2; как уменьшить краевые эффекты для начальных и конечных точек ГК; как лучше разделить вековые изменения от годовых и изменений прочих периодических сигналов? Что касается последнего

вопроса, к счастью, в нашем распоряжении уже имеется 11 лет наблюдений GRACE, подходящий выбор параметра  $L$  позволяет довольно хорошо разделить компоненты.

Следует отметить, что использование данных GRACE может способствовать увеличению точности гидрологических прогнозов [31], паводков, половодий, урожайности сельскохозяйственных культур и иметь множество других полезных приложений в народном хозяйстве.

Гравитационное поле также позволяет исследовать перераспределения масс океана, течения, внутреннее строение нашей планеты. В последние десятилетия методы дистанционного зондирования гравитационного поля дали впечатляющие результаты в виде моделей гравитационного поля Земли (GRACE, GOCE) и Луны (GRAIL, Gravity Recovery and Interior Laboratory). Космические миссии к планетам солнечной системы и их спутникам могут существенно выиграть от экспериментов с использованием гравиметрических и градиентометрических сенсоров, геодезических инструментов, которые могли бы уточнить модели внутреннего строения небесных тел.

### Литература

1. Case K., Kruizinga G, Sien-Chong Wu, GRACE Level 1B Data Product User Handbook, 2004, [ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/grace/doc/Handbook\\_1B\\_v1.2.pdf](ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/grace/doc/Handbook_1B_v1.2.pdf)
2. Tikhonov A.N., Leonov A.S., Yagola A.G. Nonlinear Ill-Posed Problems, Chapman and Hall, N.Y, London, 1998.
3. Wang Y.F., Yagola A.G., Yang C.C. Computational Methods for Applied Inverse Problems, De Gruyter & // Higher Education Press, Beijing, 2012.
4. Bettadpur S. Level-2 Gravity Field Product User Handbook, [ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/grace/doc/L2-UserHandbook\\_v2.3.pdf](ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/grace/doc/L2-UserHandbook_v2.3.pdf), 2007.
5. Пантелеев В.Л., Теория фигуры Земли. Курс лекций, 1990 <http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/russian/lecture/tfe/index.html>, 2000.
6. Сагитов М.У. Лунная гравиметрия. М.: Наука, 1979.
7. Kenyon S. et al. Toward the next Earth gravitational model // SEG Annual Meeting, San-Antonio, 2007.
8. Paulson A., Zhong S. &, Wahr J. Inference of mantle viscosity from GRACE and relative sea level data // Geophys. J. Int., 171, 497, 2007.
9. Wahr J., Molenaar M. and Bryan F. Time variability of the earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using grace // J. of Geophys. Res.: Solid Earth, 103 (B12), p. 30,205ВЦ30,229, doi:10.1029/98JB02844, 1998.
10. Klees R., Revtova E., Gunter B. et al., The design of an optimal filter for monthly GRACE gravity models // Geophys. J. Int., 175(5768), (2008), p. 417–432.

11. Kusche J., Schmidt R., Petrovic S. et al. Decorrelated GRACE time variable gravity solutions by GFZ and their validation using a hydrological Model // J. of Geodesy, 83, p. 903-913, 2009.
12. Duan X., Guo J., Shum C. and W. van der Wal. Towards an optimal scheme for removing correlated errors in GRACE data // J. Geodesy, 83, 1095B–1106, DOI 10.1007/s00190-009-0327-0, 2009.
13. Guo J., Duan X. and Shum C. Non-isotropic filtering and leakage reduction for determining mass changes over land and ocean using GRACE data // Geophys. J. Int., 181, 290B–302, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04534.x, 2010.
14. Swenson S. and Wahr J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data // Geophys. Res. Letters, 33, L08402, doi:10.1029/2005GL025285, 2006.
15. Rangelova E., W van der Wal., Braun A. et al. Analysis of GRACE time-variable mass redistribution signals over North America by means of principal components analysis // J. of Geophys. Res., 112, F03002, 2007.
16. Schrama E., Wouters B., Lavallee D. Signal and noise in Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) observed surface mass variations // J. of Geophys. Res., 112, B08407, doi:10.1029/2006JB004882, 2007.
17. Wouters B., Schrama E. Improved accuracy of GRACE gravity solution through empirical orthogonal function filtering of spherical harmonics // Geophys. Res. Letters, 34, L23711, doi:10.1029/2007GL032098, 2007.
18. Rangelova E., Sideris M. Contributions of terrestrial and GRACE data to the study of the secular geoid changes in North America // J. of Geodynamics, 46, 2008, pp. 131-143.
19. Boergens E., Rangelova E., Sideris M.G. and Kusche J. Assessment of the capabilities of the temporal and spatiotemporal ICA method for geophysical signal separation in GRACE data // JGR, 119, 4429B–4447, doi:10.1002/2013JB010452, 2014.
20. Zotov L., Shum C.K. Singular spectrum analysis of GRACE observations. AIP Proceedings of the 9th Gamow summer school, Odessa, 2009.
21. Rangelova E. et al. Spatiotemporal Analysis of the GRACE-Derived Mass Variations in North America by Means of Multi-Channel Singular Spectrum Analysis. IAG Symposia 135, Springer, Berlin/Heidelberg, 2010.
22. Ghil M., Allen R.M., Dettinger M.D. et al. Advanced spectral methods for climatic time series // Rev. Geophys. 40(1), 3.1-3.41, 2002.
23. Jolliffe I.T. Principal Component Analysis, Springer, New York, 2001.
24. Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavskiyet A. Analysis of time series structure: SSA and related techniques, Chapman & Hall/CRC, N.Y. – London. 2001.
25. Голяндина М. Метод ``гусеницы-ССА``: анализ временных рядов. СПб.: ВВМ, 2004.
26. Zotov L., Application of Multichannel singular spectrum analysis to *Альманах современной метрологии, 2015, №3*

- 
- geophysical fields and astronomical images // *Advances in Astronomy and Space Physics*, 2, 82-84, 2012.
27. Зотов Л.В. Регрессионные методы прогнозирования вращения Земли // *Вестник Московского университета*, 2005, серия физика, астрономия, 5, с. 64-68.
28. Зотов Л.В. Теория фильтрации и обработка временных рядов // Курс лекций. М.: Физический факультет МГУ, 2010.
29. Reager J.T., Thomas B.F., Famiglietti J.S. River basin flood potential inferred using GRACE gravity observations at several months lead time // *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo2203, 2014.
30. Яшкин С.Н. Спутниковая градиентометрия и системы спутник-спутник. М.: МИИГАиК, 2009.
31. Barriopedro D., Fischer E.M., Luterbacher J., Trigo R.M., Garcia Herrera R. The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe. *Science*, DOI: 10.1126/science.1201224, 2011.
32. Frappart F., Papa F., Guntner A., Ramillien G., Prigent C., Rossow W., Bonnet M. Interannual variations of the terrestrial water storage in the Lower Ob' Basin from a multisatellite approach // *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 2443-2453, 2010.
33. Landerer F., Dickey J., Zlotnicki V. Terrestrial water budget of the Eurasian pan-Arctic from GRACE satellite measurements during 2003–2009 // *J. of Geophys. Res.: Atmospheres*, 115 (D23), D 23115, doi:10.1029/2010JD014584, 2010.
34. Zonn I.S., Glantz M.H., Kostianoy A.G. and Kosarev A.N. *The Caspian Sea Encyclopedia*, Springer, Berlin – London, 2010.
35. Отчет об особенностях климата на территории Российской Федерации. Гидрометеорологический центр РФ, <http://www.meteoinfo.ru/climate> (2013).