



Оценка баланса подземных вод и их пространственного распределения в рамках миссии НАСА GRACE для р. Голубой Нил в Эфиопии (Восточная Африка)

В.Р. Чупин^{1✉}, А.К. Йоше²

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

²Университет Арба Минч, г. Арба Минч, Эфиопия

Аннотация. В работе предлагается методика оценки баланса подземных вод на примере водораздела р. Голубой Нил с использованием космических технологий НАСА GRACE. Международный спутниковый эксперимент по определению гравитации и климатических изменений (GRACE) проводится с 2002 г. для измерения пространственно-временных вариаций гравитационного поля Земли. Это система дистанционного определения изменений силы тяжести, связанных с масс потоками в земной коре. В работе используется гравитационное восстановление и климатический эксперимент с глобальной системой ассимиляции земель для расчета запасов подземных вод применительно к водоразделу р. Голубой Нил, которые базируются на обработке спутниковых данных и пространственной локализации территории водораздела р. Голубой Нил с использованием оптимально-построенной функции окна с ограниченной полосой сканирования. Запасы подземных вод и динамика их изменения исследовались с 2003 по 2010 гг. Учитывая наземные запасы воды, поверхностный сток и влажность почвы, авторы оценили накопления грунтовых вод в бассейне р. Голубой Нил. Результаты исследования показали, что среднее накопление грунтовых вод в исследуемом районе составило 1100,0 мм/год. Из-за отсутствия наземных гидрологических исследований проверка полученных данных не проводилась и была рекомендована в качестве будущего направления для исследований в этой области.

Ключевые слова: хранение подземных вод, пространственное распределение, наземное хранение воды, влажность почвы, GRACE, GLDAS

Для цитирования: Чупин В. Р., Йоше А. К. Оценка баланса подземных вод и их пространственного распределения в рамках миссии НАСА GRACE для р. Голубой Нил в Эфиопии (Восточная Африка) // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 1. С. 76–89. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-76-89>.

Original article

Evaluating groundwater balance and its spatial Distribution as part of NASA GRACE mission for Blue Nile River (Ethiopia, East Africa)

Viktor R. Chupin^{1✉}, Agegnehu K. Yoshe²

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²Arba Minch University, Arba Minch, Ethiopia

Abstract. The paper introduces a methodology for estimating groundwater balance on the example of the Blue Nile basin by means of NASA GRACE space technologies. The international Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) was launched in 2002 to measure time-space variations in the Earth's gravity field. It is a system for remote determination of changes in gravitational force associated with variations of mass within the Earth. The study involves a gravity recovery and climate experiment together with The Global Land Data Assimilation System to calculate groundwater storage as applied to the Blue Nile River basin, based on processing satellite data and spatial localization of the Blue Nile River using an optimal window function with specific scan line. Groundwater storage and its dy-

© Чупин В.Р., Йоше А.К., 2023

namics were investigated from 2003 to 2010. Considering surface water storage, surface runoff and soil moisture, the authors estimated groundwater budget in the Blue Nile River basin. According to the obtained results, the average groundwater storage in the area under study comprised 1100.0 mm/year. Due to a lack of land hydrological studies, verification of the data obtained was not carried out, but was recommended as a matter for future research in this area.

Keywords: groundwater storage, spatial distribution, surface water storage, soil moisture, GRACE, GLDAS

For citation: Chupin V.R., Yoshe A.K. Evaluating groundwater balance and its spatial distribution as part of NASA GRACE mission for Blue Nile River (Ethiopia, East Africa). *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(1):76-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-1-76-89>.

ВВЕДЕНИЕ

Для существования жизни на Земле все виды воды играют важную роль, но подземные воды являются наиболее безопасными, поскольку они процеживаются и очищаются от многочисленных загрязнений слоями почвы и почвенным покровом. Очищенные подземные воды используются для удовлетворения потребностей населения [1, 2]. Нерациональное использование, загрязнение подземных вод представляют серьезную проблему для природы и жизнедеятельности людей [3], что является растущей угрозой для водоснабжения, сельского хозяйства, продовольственной безопасности, промышленного развития и экосистемы нашей планеты в целом [2].

Дефицит и низкое качество воды могут оказать существенное влияние не только на сельскохозяйственное производство и водоснабжение, но и на все аспекты повседневной жизни людей [4]. В течение последнего столетия в связи с быстрым ростом населения, развитием сельского хозяйства, урбанизации и индустриализации спрос и конкуренция в сфере использования ресурсов пресной воды резко возросли [5].

Водопотребление выросло более чем в три раза, в то время как потребление воды на душу населения, начиная с 1950 г., увеличилось всего на 50%. Ситуация усугубляется еще и тем фактом, что вода по-прежнему в значительной степени является общедоступным мировым ресурсом.

Вода, которая находится в зоне насыщения на поверхности почвы, является наиболее доступной для людей [6, 7], а в глубоких водоносных горизонтах она пока недоступна, и на ее доступность влияют различные геоэкономические факторы [8]. Более 2-х млрд людей используют грунтовые воды в качестве основного источника водоснабжения [9], и 278,8 млрд га сельскохозяйственных угодий орошаются грунтовыми водами [6]. Спрос на грунтовые воды в

связи с экономическим ростом и ростом численности населения в будущем будет только увеличиваться [10]. Защита грунтовых вод и управление их использованием в настоящее время осуществляется путем определения потенциальных зон повышения уровня грунтовых вод и производится без оценки их объемов и динамики формирования [11].

Концепция водных ресурсов многомерна [12], не ограничивается только физическим измерением потоков и запасов, но и включает в себя другие, более качественные, экологические и социально-экономические измерения [13]. Однако оценка баланса подземных вод базируется на физической и количественной оценке водных ресурсов. Объем подземных вод оценивается через площадь водных ресурсов и определяется как средний речной сток поверхностных вод плюс подпитка водоносных горизонтов, образующихся в результате осадков [14].

Подземные воды формируются за счет естественного стока в дренажах и водоносных горизонтах [15, 16]. Оценка фактических возобновляемых водных ресурсов учитывает возможное сокращение стока в результате забора воды в верхнем течении.

Возобновляемые водные ресурсы оцениваются на основе естественного круговорота воды, который представляет долгосрочный среднегодовой расход поверхностных и подземных вод. Невозобновляемый водный ресурс – это подземные глубокие водоносные горизонты, имеющие незначительную скорость пополнения в масштабе времени относительно человеческой истории.

На гидрологический водный баланс влияет влажность, удерживаемая на поверхности и в недрах земли [17]. В гидрологии применяются различные методы для оценки потенциала и использования подземных вод [8, 18–20], но они требуют больших площадей измерения и много времени на обработку получен-

ных результатов и поэтому не являются экономически эффективными.

Наиболее эффективным в этом отношении являются методы, основанные на использовании ArcGIS и дистанционного зондирования потенциала подземных вод [21–23]: «методы отношения частот» [24–26], а также многокритериальный анализ принятия решений [27], метод веса доказательств [28, 29], регрессионные логистические методы [8], методы функции доверия доказательствам [30], методы мокрого прохода [11] и др.

Оценка баланса подземных вод является наиболее сложной задачей из-за отсутствия данных об их залегании в глубоких водоносных горизонтах [31, 32].

Чтобы решить эту проблему, используют прямое бурение скважинами и косвенно определяют факторы, влияющие на подпитку водой водоносного горизонта. При высокой пространственно-временной детерминации оценка общей емкости воды и ее составляющих будет способствовать прогнозированию климата, определению периодов засухи и оценки пополнения запасов подземных вод [33, 34]. С появлением GRACE появилась возможность с достаточной точностью оценивать запасы грунтовых вод в мировом масштабе [35–40].

Бассейн р. Голубой Нил (Аббай) является ключевой экономической зоной Эфиопии, характеризующейся интенсивной горнодобывающей, промышленной и сельскохозяйственной деятельностью. Но большая часть речного бассейна расположена в зоне полусухого климата. Повторяющиеся засухи ставят под угрозу водоснабжение и орошение целого региона. Интенсивное использование подземных вод в бассейне р. Голубой Нил в качестве альтернативного источника воды может снизить нагрузку на водоснабжение. В настоящее время отсутствует информация о подземных водах и их использовании в бассейне р. Аббай.

Цель данного исследования – получить точное представление о запасах подземных вод и оценить их объемы для водораздела р. Аббай. Для этого на исследуемой территории был разработан код сбора данных о подземных водах и проведен анализ ежемесячного, годового и сезонного их изменения, сделана оценка пространственного распределения подземных вод и рассчитан их баланс.

Район исследования расположен в северо-западной части Эфиопии на 7°40' северной широты и 12°51' северной широты и 34°25' восточной долготы и 39° 49' восточной долготы, с площадью приблизительно 176 200 км² и перепадом высот от 483 до 4266 мм над уров-

нем моря. Р. Аббай берет начало в высокогорной части Эфиопии от оз. Тана и является основным источником р. Нил.

В верхней части речного бассейна преобладают горные ландшафты, а большинство районов ниже по течению – относительно плоские или слегка волнистые. В бассейне реки имеются различные климатические зоны, обусловленные условиями окружающей среды. Максимальная температура колеблется от 28°C до 38°C, а минимальная температура составляет – 15–20°C.

Как правило, количество осадков в исследуемом районе колеблется от 787 мм до 2200 мм в год, а самое низкое зарегистрированное количество осадков – менее 100 мм/год.

Для оценки запасов подземных вод в бассейне р. Аббай использовались различные данные: влажность почвы и поверхностный сток с исследуемой территории. Был разработан код для сбора данных о подземных водах, проведен их детальный анализ. В итоге собраны и исследованы ежедневные данные о состоянии подземных водах с февраля 2003 по 2010 гг.

Запасы поверхностных и подземных вод является основными параметрами гидрологического цикла водораздела, влияющими на экологическое и климатическое состояние окружающей среды. Общий баланс рассчитывается по уравнению (1):

$$\Delta TWS = \Delta GWS + \Delta SMS + \Delta SRS + WE, \quad (1)$$

где ΔGWS – изменение объемов запаса подземных вод; ΔTWS – изменение объемов запаса наземного хранилища воды; ΔSRS – изменение объемов запаса поверхностного стока; SMS – изменение запаса влаги в почве; SWE – изменение эквивалента снежной воды.

Этапы сбора и обработки спутниковых данных

Сигналы на сфере. Точки $u \in R^2$, в блоке сфере обозначаются S^2 , могут быть параметризованы с двух пунктов с указанием широты $\theta \in [0, \pi]$ и долготы $\varphi \in [0, 2\pi)$, а $u \equiv u(\theta, \varphi)$, $(\sin \theta \cdot \cos \varphi, \sin \theta \cdot \sin \varphi, \cos \theta)$ Широта точки измеряется от положительной оси z, а долгота измеряется от положительной оси x в плоскости x–y.

Комплексно значимые и квадратные фундаментальные емкости (или сигналы), которые характеризуются на единичной сфере, образуют гильбертово пространство $L^2(S^2)$, подготовленное с учетом двух внутренних емкостей $g, h \in L^2(S^2)$, которые определяются следующим уравнением:

$$(g, h) \cong \int_{s^2} g(u) \bar{h}(u) du, \quad (2)$$

где $h(u)$ показывает комплексное сопряжение;
 $u = \sin \theta d\theta d\phi$ – элемент дифференциальной

области на сфере $\int_{s^2} = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi}$.

Сферические гармоники. Для целочисленной степени, большей или равной нулю, и целого порядка $|m| \leq l$, сферические гармонические функции были представлены $Y_{lm}(u) = Y_{lm}(\theta, \phi)$. Сферические гармоники служат полной ортонормированной базисной функцией для гильбертова пространства $L^2(S^2)$ [41], и поэтому сигнальное пространство $g \in L^2(S^2)$ было расширено с использованием сферических гармоник, определяемых уравнением (3):

$$g(u) = \sum_{lm} (g)_{lm} \cdot Y_{lm}(u), \quad \sum_{lm} \equiv \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l, \quad (3)$$

где $(g)_{lm} \cong (g, Y_{lm})$ являются сферическими гармоническими коэффициентами степеней degree $l \geq 0, |m| \leq l$. Коэффициент сфериче-

ской гармоники представляет сигнал в области гармоник. Производится ссылка на полосу сигнала f , ограниченную L , если $(f)_{lm} = 0, \nu \geq l$. Набор всех таких сигналов с ограниченной полосой пропускания на сфере из S^2 -мерного подпространства HL от $l^2(S^2)$, и их коэффициент сферической гармоники сохраняется в векторе столбцов L^2 в виде

$$g = [(g)_{0,0}, (g)_{1,1}, \dots, (g)_{L-1,L-1}]^T. \quad (4)$$

Набор данных GRACE предоставляет пространственно-временные данные в гравитационном поле с месячным временным разрешением в виде коэффициента Стокса [42].

Этот набор данных состоит из коэффициентов Стокса C_{lm} и S_{lm} как для целочисленной степени $0 \leq l$, так и для целочисленного порядка $0 \leq m \leq l$.

Коэффициенты Стокса используются для вычисления ежемесячного изменения поверхностной плотности $\Delta \delta$ по единичной сфере [16].

В настоящих исследованиях были использованы ежемесячные оптимизированные данные о Земле для оценки общего объема запасов воды за 2003–2010 гг.

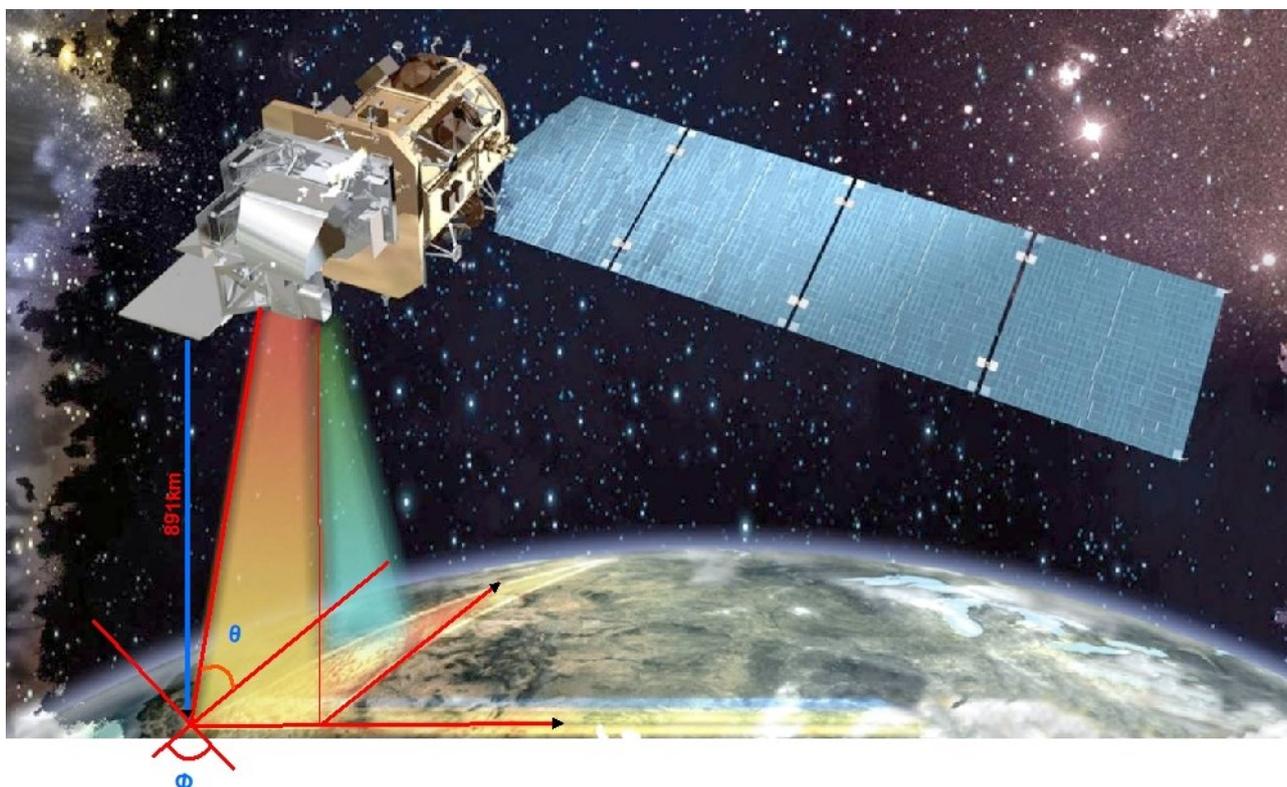


Рис. 1. Принципиальная схема расположения и работы космических аппаратов GRACE
 Fig. 1. Schematic diagram of the location and operation of GRACE spacecraft

Эти наземные данные были основаны на сферических гармонических полях, разработанных центром космических исследований Техасского университета. Этот подход был использован для преобразования коэффициентов Стокса в расчет наземных и подземных запасов вод. Данные GRACE содержат шум и эффекты размытия, которые были устранены путем сглаживания данных с учетом изменения силы тяжести [43].

Чтобы восстановить сигналы, потерянные из-за глобальной фильтрации изображения, использовался масштабный коэффициент вычисления растра, умноженный на изображение GRACE.

Данные GRACE дают среднемесячные аномалии общего запаса воды на уровне водного эквивалента:

$$\Delta\sigma(\theta, \phi) = \frac{\alpha \cdot \rho\alpha}{3} \cdot \sum_{l,m} \frac{2 \cdot l + 1}{1 + X \cdot k_l} \cdot (\Delta \bar{C}_{lm} \cdot X_l^m(\theta) \cdot \cos\theta +$$

$$+ \Delta \bar{S}_{lm} Y_l^m(\theta) \sin\theta$$

где $\alpha = 6371,008$ км – средний радиус земли; $\rho\alpha = 5517 \text{ kg/m}^3$ – средняя плотность земли; K_l^m – число Лява нагрузки в степени l ; $X_l^m(\theta)$ – связанная функция Лежандра [42].

Глобальная система ассимиляции земельных данных (GLDAS)

Оценка влажности почвы и поверхностного стока в системе GLDAS являются очень важными компонентами для оценки подземных вод, которые можно получить только с помощью наземных измерений. Получить точные данные в региональном масштабе сложно, поэтому глобальные гидрологические различия в широком масштабе GLDAS могут сделать гораздо лучше, чем станции, так как используя ассимиляцию данных и передовые методы моделирования поверхности земли GLDAS, создает наборы данных дистанционного зондирования для получения оптимальных характеристик поверхности земли. GLDAS – это глобальная система моделирования, включающая спутниковые и наземные измерения и имеет высокое пространственное разрешение $0,25^\circ$. Используя приведенное выше уравнение (2)–(5), были определены величины изменения влажности почвы поверхностных и снежных вод. Для генерации оптимальной поверхности суши был доступен GLDAS в пространственной области с равноугольным разрешением $0,25^\circ$ [37]. Также были собраны данные о запасах грунтовых вод для GLDAS путем создания для исследуемой области соответствующего кода с помощью движка Google.

Обработав данные GRACE за 2003–2010 гг.,

первый временной из коэффициентов Стокса $C_{lm}^{(t)}$ и $S_{lm}^{(t)}$ был получен путем поиска гравитационных аномалий коэффициентов $C_{lm}^{(t)}$ и $S_{lm}^{(t)}$. Затем коэффициент сферической гармоники был получен путем ограничения диапазона коэффициента Стокса при степени сферической гармоники L для всех неотрицательных порядков m [44]:

$$\Delta(f)_{l,m}(t) = \Delta C_{lm} - i \cdot \Delta S_{lm}(t), \quad (6)$$

где f – вещественный сигнал гравитационной аномалии. Сопряженное соотношение симметрии, заданное как

$$\Delta(f)_{l,-m}^{(t)} = (-1)^m \cdot \Delta \bar{f}_{lm}^{(t)}.$$

Сглаживание рассчитано следующим образом:

$$h(\theta, \phi) = h(\theta) = \frac{K \exp(K \cdot \cos\theta)}{4 \cdot \Pi \cdot \sinh k}. \quad (7)$$

Сглаживание для получения коэффициентов сферической гармоники отфильтрованного сигнала \mathcal{G} производилось следующим образом:

$$\mathcal{G}_{lm}(t) = \frac{\Pi + 1/2(K)}{1/2(K)} \cdot \Delta(f)_{lm}, \quad (8)$$

где $I_{l+1/2}$ – модифицированная функция Бесселя первого рода полуцелого порядка, а $k > 0$ – константа, управляющая степенью гладкости. Используя отфильтрованные коэффициенты, было рассчитано временное изменение поверхностной плотности земли следующим образом:

$$\mathcal{G}\Delta\sigma^{(t)}(\theta, \phi) = \frac{R \cdot \rho\alpha}{3} \cdot \sum_{l,m} \frac{2 \cdot l + 1}{1 + k_l} \cdot (\mathcal{G})_{lm}^{(t)} \cdot Y_l^m(\theta, \phi); \quad (9)$$

$$\Delta TWS^{(t)}(\theta, \phi) = \frac{1}{\rho_w} \cdot \Delta\sigma^{(t)}(\theta, \phi). \quad (10)$$

Разделив $\Delta\sigma(t)(\theta, \phi)$ на плотность воды $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, получим пространственно-временные вариации и в наземных хранилищах воды (TWS) [16].

Для оценки TWS в бассейне р. Аббай были определены средние локальные колебания запасов воды на суше. Для локализации глобального сигнала была предложена функция окна с ограниченной полосой пропускания в пространственной области с оптимальной концентрацией энергии.

Для пространственной локализации TWS в бассейне р. Аббай функция окна была разработана путем решения сферической задачи пространственно-спектральной концентрации, которая максимизирует коэффициент концентрации энергии сигнала с ограниченной полосой пропускания fEN_L в пределах пространственной области (R). Коэффициент концен-

трации энергии был рассчитан следующим образом [45]:

$$\lambda = \sum_{l,m} \sum_{p,q} (\bar{f})_l^m \cdot (f)_p^q \cdot K_{lm,pq} = \frac{f^H \cdot kf}{f^H \cdot f}, \quad (11)$$

где $|f(u)|^2 = f(u) \cdot \bar{f}(u)$ ортогональность сферических гармоник на сфере и $(\cdot)^H$ представляет сопряженное транспонирование, а введенная индексация принята для определения $L^2 \times L^2$ матрицы K с элементами

$$K_{lm,pq} \equiv \int_R Y_{lm}(\theta, \phi) \cdot Y_{pq} \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi. \quad (12)$$

Максимизация коэффициента концентрации энергии $\lambda = \frac{f^H \cdot Kf}{f^H \cdot f}$ эквивалентна решению задачи на собственные значения:

$$Kf = \lambda f. \quad (13)$$

L^2 – собственные функции, ограниченные полосой пропускания на сфере, а собственное значение λ количественно определяет концентрацию энергии, которая связана с собственной функцией s в области R . Собственная функция с максимальной концентрацией использовалась для области, представляющей интерес для локализации сигнала, и относится к оптимальной оконной функции. Для расчета $K_{lm,pq}$ бассейна р. Аббай площадь R была разделена на несколько подобластей широты-долготы (14):

$$\bar{R} \equiv \{(\theta, \phi) : \theta_{k,1} \leq \theta \leq \theta_{k,2}, \phi_{k,1} \leq \phi \leq \phi_{k,2}\}. \quad (14)$$

Для каждой подобласти

$$K_{lm,pq}^2 \equiv \int_R \bar{Y}_l^m(\theta, \phi) \cdot Y_p^q \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi. \quad (15)$$

или для подобластей:

$$K_{lm,pq}^k = \sum_{m'} \sum_{q'} F_{m',m}^l \cdot Q(m' + q') \cdot S(q - m), \quad (16)$$

где $Q(m)$, $S(m)$ и $F_{m',m}^l$ рассчитываются по следующим формулам:

$$Q(m) = \begin{cases} \frac{1}{4}(i \cdot 2 \cdot m(\theta_{k,2} - \theta_{k,1}) + e^{i \cdot 2 \cdot m \cdot \theta_{k,1}} - e^{i \cdot 2 \cdot m \cdot \theta_{k,2}}, |m| = 1 \\ \frac{1}{m^2 - 1}(e^{i \cdot 2 \cdot m \cdot \theta_{k,1}}(-\cos \theta_{k,1} + i \cdot m \cdot \sin \theta_{k,1}) - \\ - e^{i \cdot 2 \cdot m \cdot \theta_{k,2}}(\cos \theta_{k,1} - i \cdot m \cdot \sin \theta_{k,1}), |m| \neq 1 \end{cases}$$

$$S(m) = \begin{cases} \phi_{k,2} - \phi_{k,1}, |m| = 1 \\ \frac{1}{m}(e^{i \cdot 2 \cdot m \cdot \phi_{k,1}} - e^{i \cdot 2 \cdot m \cdot \phi_{k,2}}), |m| \neq 1 \end{cases} \quad (17)$$

$$F_{m',m}^l = (-i)^m \sqrt{\frac{2 \cdot l + 1}{4 \cdot \Pi}} \cdot \Delta_{m',m}^l \quad (18)$$

где $\Delta_{lmn} \equiv dlmn \left(\frac{\Pi}{2}\right)$.

Используя оптимальное окно, предложенное для бассейна р. Аббай и представленное как Q_{ABRB} , первое наземное хранилище воды (TWS) в бассейне р. Аббай было рассчитано следующим образом:

$$\Delta TWS_{ABRB}^{(t)} = Q_{ABRB}(\theta, \phi) \langle (\theta, \phi) \cdot \Delta TWS^{(t)}(\theta, \phi) \rangle. \quad (19)$$

Далее с течением времени из GLDAS было вычислено второе накопление влаги в почве и эквивалент снежной воды. Данные GLDAS, обозначенные g , были доступны в пространственной области, коэффициенты сферических гармоник были рассчитаны с помощью преобразования сферических гармоник:

$$\Delta g(\theta)_{abbay} = \langle g(t)(\theta, \phi), Y_{lm}(\theta, \phi) \rangle. \quad (20)$$

Затем путем ограничения коэффициента сферической гармоники в степени L и применения гауссового сглаживания оценивалось $\Delta g(t)_{lm}$ следующим образом:

$$\Delta g(t) = \sum_{l,m}^{l=L} \frac{l+1/2(K)}{l/2(K)} \cdot \Delta(g)(t)_{lm} \cdot Y(\theta, \phi). \quad (21)$$

Затем выполнялась локализация с использованием предложенного оптимального окна для получения SWE или SMS в бассейне р. Аббай:

$$\Delta g_{wabyABRB} = \langle g^{(t)}(\theta, \phi), Y_{lm}(\theta, \phi) \rangle \quad (22)$$

После нахождения

$$\Delta SWE_{abb}(t)(\theta, \phi) u \Delta SWS_{abb}(\theta, \phi),$$

запасы подземных вод были рассчитаны следующим образом:

$$\Delta g^{(t)}(\theta, \phi) = \sum_{l,m}^{l=L} \frac{I_{l+1/2} \cdot k}{I_{l/2} \cdot k} \cdot \Delta g_{lm}^t \cdot Y_{lm}(\theta, \phi). \quad (23)$$

Далее ежемесячно оценивались изменения запасов воды на суше, влажность почвы, объемы поверхностного стока. В итоге, с помощью уравнения (24) была исследована динамика изменения грунтовых вод во времени:

$$\Delta GWS_{ABRB}^{(t)}(\theta, \phi) = \Delta TWS_{abABRB}^{(t)}(\theta, \phi) - \Delta SWS_{ABRB}^{(t)}(\theta, \phi) - \Delta SWE_{ABRB}^{(t)}(\theta, \phi). \quad (24)$$

На основании проведенных расчетов в исследуемой области выделены четыре временных ряда: весенний сезон (март, апрель, май), летний сезон (июнь, июль, август), осенний сезон (сентябрь, октябрь, ноябрь) и зимний сезон (декабрь, январь, февраль).

Для представления месячных, сезонных и годовых данных на основании метода регрессии был проведен расчет временных трендов [46]. При этом сделано предположение, что ряды данных не имеют последовательной корреляции, и для их оценки можно использовать тест Манна-Кендалла, который применяется для анализа тренда в климатологических и гидрологических временных рядах [47].

В этом тесте нулевая гипотеза H_0 предполагает, что реализации независимы, и монотонный тренд существует во временном ряду. Предполагая, что X_i и X_j являются двумя подмножествами рядов данных, где $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$ и $j = i+1, i+2, i+3, \dots, n$.

Статистика Манна–Кендалла S_m может быть представлена следующим образом:

$$S_m = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (X_j - X_i); \quad (25)$$

$$\text{sign}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1, & X_j - X_i > 0 \\ 0, & X_j - X_i = 0 \\ -1 & X_j - X_i < 0 \end{cases}. \quad (26)$$

Дисперсия σ^2 для статистики S_m определяется как

$$\sigma^2 = \left[\frac{n(n-1) \cdot (2 \cdot n + 5)}{18} \right]. \quad (27)$$

Стандартная тестовая статистика Z_s рассчитывается следующим образом:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S_m - 1}{\sigma} & \text{для } S_m > 0 \\ 0 & \text{для } S_m = 0 \\ \frac{S_m + 1}{\sigma} & \text{для } S_m < 0 \end{cases}. \quad (28)$$

Если $|Z_s|$ больше, чем $Z_{100-\alpha}$, (где α представляет выбранный уровень значимости на уровне 5% значимости или 95% доверительный уровень с Z95%), то нулевая гипотеза недействительна, подразумевая, что тенденция значима. Положительные значения статистики Z указывают на тенденцию к увеличению, в то время как отрицательные значения статистики Z представляют отрицательный тренд [48].

Для информационной пары величина наклона определяется следующим уравнением:

$$Q_i = \frac{X_j - X_k}{j - k} \text{ где, } (j > k) \text{ (for } i=1, 2, 3, \dots, N), \quad (29)$$

где X_k и X_j – значения данных за годы k и j , для $j < k$. Если во временном ряду имеется n значений X_i , то для оценки наклона Q_i принимаются целые значения

$$N = n \cdot \frac{n-1}{2}. \quad (30)$$

Оценка наклона Sen – это медиана значений N , которая определяется следующим образом:

$$Q_i = \begin{cases} \frac{(N+1)}{2}, & \text{если } N \text{ нечетно,} \\ QN/2 + Q(N+2)/2, & \text{если } N \text{ четно} \end{cases}. \quad (31)$$

Когда N – четное число, то оценка наклона Sen вычисляется как $Q_{med} = T \cdot \frac{N+1}{2}$, если N нечетное, то оценка наклона рассматривалась как $Q_{med} = QN/2 + Q \cdot \frac{N+2}{2}$. Наконец, Q_{med} вы-

числяется с помощью двустороннего теста со 100% доверительным интервалом, а затем наклон вычисляется с помощью непараметрического теста. Положительное значение Sen представляет собой тенденцию к увеличению, а отрицательное значение показывает тенденцию к уменьшению во временном ряду. Алгоритм и последовательность обработки спутниковых данных и вычислений представлены на рис. 2.

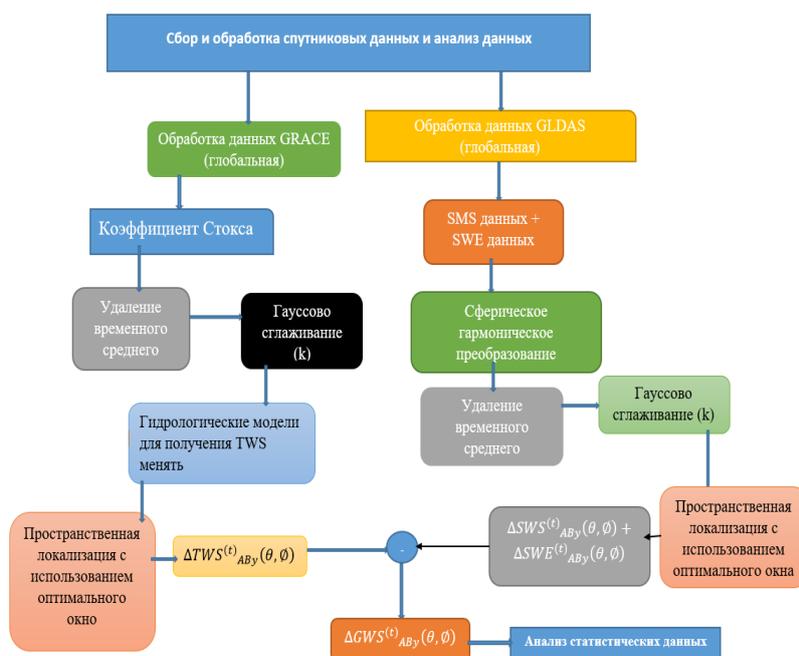


Рис. 2. Последовательность обработки спутниковых данных
Fig. 2. Sequence of satellite data processing

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В этом исследовании для определения и оценки запасов подземных вод в бассейне р. Аббай 2003–2010 гг. значения наземных запасов воды были получены из набора данных GRACE, а влажность почвы и поверх-

ностный сток были извлечены с помощью данных GLDAS. Результаты расчетов, выполненные согласно (1)–(30), представлены на рис. 3, из которого следует, что в бассейне р. Аббай наблюдаются колебания грунтовых вод по временам года.

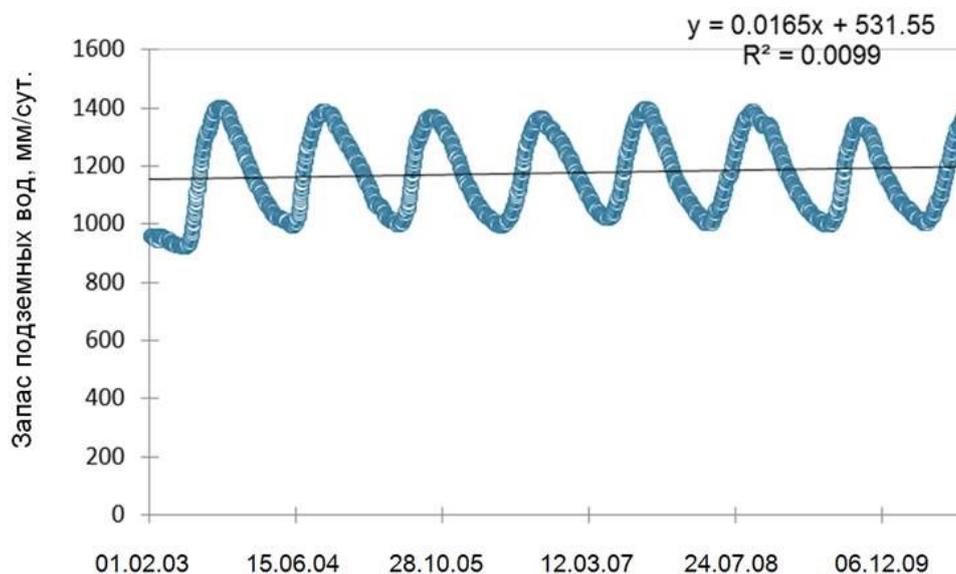


Рис. 3. Накопление грунтовых вод на исследуемой территории за 2003–2010 гг.
Fig. 3. Groundwater accumulation in the study area for 2003-2010

Временные ряды для полученных данных были проверены при уровне значимости 5% и 95% в доверительном интервале от наклона Sen. Статистический результат был обобщен в табл. 1, где указано минимальное значение – 924,978 мм/сут, максимальное – 1403,12 мм/сут и 1176,469 мм/сут запасов подземных вод в исследуемом районе.

При использовании теста тренда Манна–Кендалла (тест с двумя хвостами для хранения) для измерения уровня подземных вод, результат показывает, что наклон тренда

0,049 Кендалла менее 0,0001 р-значения двух хвостов, 2 683 343 229,000 дисперсия при угле альфа, равном 0,05. Наклон Сена был оценен в 0,011, а перехват – в 725,59.

Для дальнейшего анализа и понимания состояния подземных вод в исследуемом районе было выявлено ежемесячное (табл. 2), годовое и сезонное (табл. 3) усредненное значение полученных данных.

Среднее накопление подземных вод с 2003 по 2010 гг. в исследуемом районе представлено также в табл. 3.

Таблица 1. Статистический результат для хранения подземных вод в исследуемом районе
Table 1. Statistical result for groundwater storage in the study area

Переменная	Наблюдения	Обследование с отсутствующими данными	Обследование без пропущенных данных	Min	Max	Значение	Зппп. отклонение
Хранилище подземных вод	2890	0	2890	924,978	1403,120	1176,469	138,641

Таблица 2. Месячный запас грунтовых вод на исследуемой территории в мм в месяц
Table 2. Monthly groundwater supply in the study area in mm per month

Год	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
2003	0,00	954,80	954,70	938,20	927,90	955,95	1151,02	1319,43	1387,61	1387,61	1322,41	1250,01
2004	1168,00	1107,00	1054,00	1022,00	1007,00	1029,33	1217,79	1347,46	1384,69	1367,04	1309,62	1256,54
2005	1197,30	1132,90	1070,00	1031,00	1008,00	1025,73	1189,34	1322,26	1367,96	1348,57	1297,56	1221,94
2006	1142,10	1082,00	1039,00	1013,00	1001,00	1037,55	1144,50	1296,73	1357,82	1344,07	1306,06	1260,76
2007	1197,40	1139,00	1081,00	1038,00	1026,00	1089,66	1236,74	1352,23	1392,75	1357,35	1284,65	1199,05
2008	1123,80	1076,00	1034,00	1009,00	1042,00	1126,54	1228,85	1341,43	1381,52	1353,25	1327,88	1252,84
2009	1172,80	1114,00	1064,00	1028,00	1007,00	1012,31	1122,96	1284,40	1339,48	1315,43	1245,48	1169,00
2010	1110,10	1067,00	1038,00	1014,00	1022,00	1090,05	1203,09	1318,68	1369,68	1347,57	1275,58	1203,77

Таблица 3. Сезонные и годовые запасы подземных вод в исследуемом районе
Table 3. Seasonal and annual groundwater reserves in the study area

Год	Весна	Лето	Осень	Зима	Итого за год
2003	940,32	1142,13	1365,88	477,4	1045,82
2004	1028,26	1198,19	1353,78	1137,74	1189,39
2005	1036,93	1179,11	1338,03	1164,76	1184,47
2006	1018,01	1159,59	1335,98	1112,55	1168,88
2007	1048,86	1226,21	1344,92	1168,22	1199,62
2008	1028,75	1232,27	1354,22	1099,94	1191,54
2009	1033,67	1139,89	1300,13	1143,6	1156,44
2010	1024,85	1203,94	1330,94	1088,62	1171,68

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка подземных вод с использованием методов точечного измерения в больших масштабах затруднена. Однако в данной работе показано, что эту проблему можно решить путем создания кода для сбора данных о подземных водах для исследуемого района и представления структуры обработки спутниковых данных GRACE и GLDAS. Обработанные данные представляли собой локализованную оконную функцию, ограниченную полосой пропускания в области сферических гармоник и имели максимальную концентрацию энергии в пространственной области. Поскольку размеры окна требуют вычисления интеграла по интересующей области, мы по-

строили оптимальное окно для ABRV, разделив пространственную область на несколько подобластей и выполнив вычисления по каждой подобласти с использованием аналитических выражений. С использованием наземных хранилищ воды, поверхностного стока и влажности почвы были оценены запасы грунтовых вод в бассейне р. Аббай с 2003 по 2010 гг. Полученные результаты являются полезными для лиц, принимающих решения в области водоснабжения, сельского хозяйства и добычи полезных ископаемых. Они позволят управлять водными ресурсами в исследуемом бассейне и оценивать тенденции нехватки воды, вызванной засухой и изменением климата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ali S., Wang Q., Liu D., Fu Q., Mafuzur Rahaman M., Abrar Faiz M., et al. Estimation of spatio-temporal groundwater storage variations in the lower transboundary Indus Basin using GRACE satellite // Journal of Hydrology. 2022. Vol. 605. P. 127315. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127315>.
2. Pande C.B. Watershed management and development. In: Sustainable watershed development. Springer briefs in water science and technology. Cham: Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47244-3_2.
3. Pande C.B. Introduction. In Sustainable watershed development. Springer briefs in water science and technology. Cham: Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47244-3_1.
4. Elliott J., Deryng D., Müller C., Frieler K., Konzmann M., Gerten D., et al. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change // Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2014. Vol. 111. No. 9. P. 3239–3244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222474110>.
5. Kinzelbach W., Bauer P., Siegfried T., Brunner P. Sustainable groundwater management – problems

- and scientific tools // Episodes. Journal of International Geosciences. 2003. Vol. 26. No. 4. P. 279–284. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2003/v26i4/002>.
6. Berhanu B., Seleshi Y., Melesse A.M. Surface Water and Groundwater Resources of Ethiopia: Potentials and Challenges of Water Resources Development. In: Nile River Basin; Ed.: A. Melesse, W. Abtew, S. Setegn. Cham: Springer, 2014. P. 97–117.
7. Fitts C.R. Groundwater science. Oxford, UK: Elsevier Science, 2002. 450 p.
8. Jha M.K., Chowdary V.M., Chowdhury A. Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques // Hydrogeology Journal. 2010. Vol. 18. P. 1713–1728.
9. Richey A.S., Thomas B.F., Lo M.H., Reager J.T., Famiglietti J.S., Voss K., et al. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE // Water Resources Research. 2015. No. 51. P. 5217–5238. doi:10.1002/2015WR017349.
10. Erzin A.E., Hoekstra A.Y. Water footprint scenarios for 2050: A global analysis // Environment International. 2014. No. 64. P. 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.019>.
11. Batelaan O., De Smedt F. WetSpa: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional groundwater modeling / H. Gehrels, J. Peters, E. Hoehn, K. Jensen, C. Leibundgut, J. Griffioen, et al. (Eds.). Impact of human activity on groundwater dynamics. IAHS Publ. 2001. No. 269. P. 11–17.
12. Li M., Guo P., Ren Ch. Water resources management models based on two-level linear fractional programming method under uncertainty // Journal of Water Resources Planning and Management. 2015. Vol. 141. Iss. 9. P. 05015001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000518](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000518).
13. Yin J., Tsai F.T.-C. Saltwater Scavenging Optimization under Surrogate Uncertainty for a Multi-Aquifer System // Journal Hydrology. 2018. No. 565. P. 698–710. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.021>.
14. Yin J., Tsai F.T.-C. Steady-State Approximate Freshwater–Saltwater Interface in a Two-Horizontal-Well Scavenging System // Journal Hydrology Engineering. 2019. Vol. 24. No. 10. P. 06019008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001836](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001836).
15. Pham H. V., Tsai F. T.-C. Modeling complex aquifer systems: A case study in Baton Rouge, Louisiana (USA) // Hydrogeology Journal. 2017. Vol. 25. P. 601–615.
16. Wahr J., Molenaar M., Brya F. Time variability of the earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1998. Vol. 103. No. B12. P. 30205–30229. <https://doi.org/10.1029/98JB02844>.
17. Khan S., Rana T., Gabriel H.F., Ullah M.K. Hydrogeologic assessment of escalating groundwater exploitation in the Indus Basin // Pakistan Hydrogeol Journal. 2008. Vol. 16. P. 1635–1654. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0336-8>.
18. Israil M., Al-Hadithi M., Singhal D. Application of a resistivity survey and geographical information system (GIS) analysis for hydrogeological zoning of a piedmont area, Himalayan foothill region, India // Hydrogeology Journal. 2006. Vol. 14. P. 753–759. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0483-0>.
19. Todd D.K., Mays L.W. Groundwater Hydrology. 2nd ed. New York: Wiley, 1980. 535 p.
20. Sander P., Chesley M.M., Minor T.B. Groundwater assessment using remote sensing and GIS in a rural groundwater project in Ghana: lessons learned // Hydrogeology Journal. 1996. Vol. 4. No. 3. P. 40–49.
21. Anteneh Z.S., Awoke B.G., Reda T.M., Jothmani M. Groundwater potential mapping using integrations of remote sensing and analytical hierarchy process methods in Ataye-watershed, Middle Awash Basin, Ethiopia // Sustainable Water Resources Management volume. 2002. Vol. 8. No. 183. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00772-4>.
22. Fashae O.A., Tijani M.N., Talabi A.O., Adedeji O.I. Delineation of groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW-Nigeria: an integrated GIS and remote sensing approach // Applied Water Science. 2014. Vol. 4. P. 19–38.
23. Rodell M., Houser P., Jambor U., Gottschalck J., Mitchell K., Meng C.-J., et al. The global land data assimilation system // Bulletin of the American Meteorological Society. 2004. Vol. 85. No. 3. P. 381–394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>.
24. Oh H.-J., Kim Y.-S., Choi J.-K., Park E., Lee S. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea // Journal of Hydrology. 2011. Vol. 399. Iss. 3–4. P. 158–172. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.027>.
25. Siebert S., Henrich V., Frenken K., Burke J. Update of the digital global map of irrigation areas to version 5. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, Germany and Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 2013. 171 p.
26. Singh A.K., Prakash S.R. An integrated approach of remote sensing, geophysics and GIS to evaluation of groundwater potentiality of Ojhala sub-watershed. Mirzapur district, UP, India. Asian conference on GIS, GPS, aerial photography and remote sensing. Thailand, Bangkok. 2002. P. 7–9.
27. Kaliraj S., Chandrasekar N., Magesh N. Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique // Arabian Journal of Geosciences. 2014. Vol. 7.

- P. 1385–1401.
28. Pourtaghi Z.S., Pourghasemi H.R. GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, Iran // *Hydrogeology Journal*. 2014. Vol. 22. P. 643–662.
29. Ozdemir A. Using a binary logistic regression method and GIS for evaluating and mapping the groundwater spring potential in the Sultan Mountains (Aksehir, Turkey) // *Journal of Hydrology*. 2011. Vol. 405. Iss. 1–2. P. 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.015>.
30. Nampak H., Pradhan B., Manap M.A. Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation // *Journal of Hydrology*. 2014. Vol. 513. P. 283–300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.053>.
31. Cheema M.J.M., Immerzeel W.W., Bastiaanssen W.G.M. Spatial quantification of groundwater abstraction in the irrigated Indus Basin // *Groundwater*. 2014. Vol. 52. Iss. 1. P. 25–36. <https://doi.org/10.1111/gwat.12027>.
32. Pande C.B. Sustainable watershed development planning. Part of the Springer briefs in water science and technology book series. Cham: Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47244-3_4.
33. Awais M., Li W., Cheema M.J.M., Hussain S., AlGarni T.S., Liu C., et al. Remotely sensed identification of canopy characteristics using UAV-based imagery under unstable environmental conditions // *Environ Technol Innov*. 2021. Vol. 22. P. 101465. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101465>.
34. Shum C.K., Guo J.Y., Hossain F., Duan J., Alsdorf D.E., Duan X.J., et al. Inter-annual water storage changes in Asia from GRACE data. In: *Climate change and food security in South Asia*. Dordrecht: Springer, 2010. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9516-9_6.
35. Famiglietti J.S., Lo M., Ho S.L., Bethune J., Anderson K.J., Syed T.H., et al. Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. Iss. 3. <https://doi.org/10.1029/2010GL0464>.
36. Feng W., Zhong M., Lemoine J.M., Biancale R., Hsu H.T., Xia J. Evaluation of groundwater depletion in North China using the gravity recovery and climate experiment (GRACE) data and ground-based measurements // *Water Resources Research*. 2013. Vol. 49. Iss. 4. P. 2110–2118. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20192>.
37. Rodell M., Velicogna I., Famiglietti J.S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India // *Nature*. 2009. Vol. 460. P. 999–1002. <https://doi.org/10.1038/nature08238>.
38. Scanlon B.R., Longuevergne L., Long D. Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA // *Water Resources Research*. 2012. Vol. 48. Iss. 4. P. 1–9. <https://doi.org/10.1029/2011WR011312>.
39. Strassberg G., Scanlon B.R., Chambers D. Evaluation of groundwater storage monitoring with the GRACE satellite: case study of the high plains aquifer, central United States // *Water Resources Research*. 2009. Vol. 45. Iss. 5. P. 1–10. <https://doi.org/10.1029/2008WR006892>.
40. Strassberg G., Scanlon B.R., Rodell M. Comparison of seasonal terrestrial water storage variations from GRACE with groundwater-level measurements from the High Plains Aquifer (USA) // *Geophysical Research Letters*. 2007. Vol. 34. No. 14. P. 1–5. <https://doi.org/10.1029/2007GL030139>.
41. Kennedy R.A., Sadeghi P. *Hilbert Space Methods in Signal Processing*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 420 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511844515>.
42. Case K., Kruizinga G., Wu S.C. GRACE level 1B data product user handbook. Technical report, JPL D-22027, Jet Propulsion Laboratory. Pasadena, 2010.
43. Duan X.J., Guo J.Y., Shum C.K., van der Wal W. On the postprocessing removal of correlated errors in GRACE temporal gravity field solutions // *Journal of Geodesy*. 2009. Vol. 83. P. 1095–1106. <https://doi.org/10.1007/s00190-009-0327-0>.
44. Shoaib Ali, Dong Liu, Qiang Fu, Muhammad Jehanzeb Masud Cheema, Quoc Bao Pham, Md. Mafuzur Rahaman, et al. Improving the resolution of grace data for spatio-temporal groundwater storage assessment // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. No. 17. P. 3513. <https://doi.org/10.3390/rs13173513>.
45. Simons F.J., Dahlen F., Wiecek M.A. Spatiospectral concentration on a sphere // *SIAM review*. 2006. Vol. 48. No. 3. P. 504–536. <https://doi.org/10.1137/S0036144504445765>.
46. Tirkey N., Parhi P.K., Lohani A.K., Chandniha S.K. Analysis of precipitation variability over Satluj Basin, Himachal Pradesh, India: 1901–2013 // *Journal of Water and Climate Change*. 2020. Vol. 12. № 1. P. 127–135. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.136>.
47. Sharma P., Machiwal D., Jha M.K. Overview, current status, and future prospect of stochastic time series modeling in subsurface hydrology. New York: Elsevier; 2019. p. 133–151. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815413-7.00010-9>.
48. Timbadiya P.V., Mirajkar A., Patel P., Porey P. Identification of trend and probability distribution for time series of annual peak flow in Tapi Basin, India // *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 2013. Vol. 19. No. 1. P. 11–20. <https://doi.org/10.1080/09715010.2012.739354>.

REFERENCES

1. Ali S., Wang Q., Liu D., Fu Q., Mafuzur Rahaman M., Abrar Faiz M., et al. Estimation of spatio-temporal groundwater storage variations in the lower transboundary Indus Basin using GRACE satellite. *Journal of Hydrology*. 2022;605:127315. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127315>.
2. Pande C.B. Watershed management and development. In: Sustainable watershed development. Springer briefs in water science and technology. Cham: Springer; 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47244-3_2.
3. Pande C.B. Introduction. In Sustainable watershed development. Springer briefs in water science and technology. Cham: Springer; 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47244-3_1.
4. Elliott J., Deryng D., Müller C., Frieler K., Konzmann M., Gerten D., et al. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2014;111(9):3239-3244. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222474110>.
5. Kinzelbach W., Bauer P., Siegfried T., Brunner P. Sustainable groundwater management – problems and scientific tools. *Episodes. Journal of International Geosciences*. 2003;26(4):279-284. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2003/v26i4/002>.
6. Berhanu B., Seleshi Y., Melesse A.M. Surface Water and Groundwater Resources of Ethiopia: Potentials and Challenges of Water Resources Development. In: Nile River Basin; Ed.: A. Melesse, W. Abtew, S. Setegn. Cham: Springer; 2014. p. 97-117.
7. Fitts C.R. Groundwater science. Oxford, UK: Elsevier Science; 2002. 450 p.
8. Jha M.K., Chowdary V.M., Chowdhury A. Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques. *Hydrogeology Journal*. 2010;18:1713-1728.
9. Richey A.S., Thomas B.F., Lo M.H., Reager J.T., Famiglietti J.S., Voss K., et al. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research*. 2015;51:5217-5238. <https://doi.org/10.1002/2015WR017349>.
10. Ericin A.E., Hoekstra A.Y. Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. *Environment International*. 2014;64:71-82. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.019>.
11. Batelaan O., De Smedt F. WetSpa: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional groundwater modeling. In: H. Gehrels, J. Peters, E. Hoehn, K. Jensen, C. Leibundgut, J. Griffioen, et al. (Eds.). Impact of human activity on groundwater dynamics. IAHS Publ; 2001. No. 269. p. 11-17.
12. Li M., Guo P., Ren Ch. Water resources management models based on two-level linear fractional programming method under uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2015;141(9):05015001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000518](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000518).
13. Yin J., Tsai F.T.-C. Saltwater Scavenging Optimization under Surrogate Uncertainty for a Multi-Aquifer System. *Journal Hydrology*. 2018;565:698-710. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.021>.
14. Yin J., Tsai F.T.-C. Steady-State Approximate Freshwater–Saltwater Interface in a Two-Horizontal-Well Scavenging System. *Journal Hydrology Engineering*. 2019;24(10):06019008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001836](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001836).
15. Pham H.V., Tsai F.T.-C. Modeling complex aquifer systems: A case study in Baton Rouge, Louisiana (USA). *Hydrogeology Journal*. 2017;25:601-615.
16. Wahr J., Molenaar M., Brya F. Time variability of the earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1998;103(B12):30205-30229. <https://doi.org/10.1029/98JB02844>.
17. Khan S., Rana T., Gabriel H.F., Ullah M.K. Hydrogeologic assessment of escalating groundwater exploitation in the Indus Basin. *Pakistan Hydrogeology Journal*. 2008;16:1635-1654. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0336-8>.
18. Israil M., Al-Hadithi M., Singhal D. Application of a resistivity survey and geographical information system (GIS) analysis for hydrogeological zoning of a piedmont area, Himalayan foothill region, India. *Hydrogeology Journal*. 2006;14:753-759. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0483-0>.
19. Todd D.K., Mays L.W. Groundwater Hydrology. 2nd ed. New York: Wiley; 1980. 535 p.
20. Sander P., Chesley M.M., Minor T.B. Groundwater assessment using remote sensing and GIS in a rural groundwater project in Ghana: lessons learned. *Hydrogeology Journal*. 1996;4(3):40-49.
21. Anteneh Z.S., Awoke B.G., Reda T.M., Jothmani M. Groundwater potential mapping using integrations of remote sensing and analytical hierarchy process methods in Ataye-watershed, Middle Awash Basin, Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management volume*. 2002;8(183). <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00772-4>.
22. Fashae O.A., Tijani M.N., Talabi A.O., Adedeji O.I. Delineation of groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW-Nigeria: an integrated GIS and remote sensing approach. *Applied Water Science*. 2014;4:19-38.
23. Rodell M., Houser P., Jambor U., Gottschalk J., Mitchell K., Meng C.-J., et al. The global land

- data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2004;85(3):381-394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>.
24. Oh H.-J., Kim Y.-S., Choi J.-K., Park E., Lee S. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*. 2011;399(3-4):158-172. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.027>.
25. Siebert S., Henrich V., Frenken K., Burke J. Update of the digital global map of irrigation areas to version 5. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, Germany and Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy; 2013. 171 p.
26. Singh A.K., Prakash S.R. An integrated approach of remote sensing, geophysics and GIS to evaluation of groundwater potentiality of Ojhala sub-watershed. Mirzapur district, UP, India. Asian conference on GIS, GPS, aerial photography and remote sensing. Thailand, Bangkok; 2002. P. 7-9.
27. Kaliraj S., Chandrasekar N., Magesh N. Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique. *Arabian Journal of Geosciences*. 2014;7:1385-1401.
28. Pourtaghi Z.S., Pourghasemi H.R. GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, Iran // *Hydrogeology Journal*. 2014. Vol. 22. P. 643-662.
29. Ozdemir A. Using a binary logistic regression method and GIS for evaluating and mapping the groundwater spring potential in the Sultan Mountains (Aksehir, Turkey). *Journal of Hydrology*. 2011;405(1-2):123-136. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.015>.
30. Nampak H., Pradhan B., Manap M.A. Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *Journal of Hydrology*. 2014;513:283-300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.053>.
31. Cheema M.J.M., Immerzeel W.W., Bastiaanssen W.G.M. Spatial quantification of groundwater abstraction in the irrigated Indus Basin. *Groundwater*. 2014;52:25-36. <https://doi.org/10.1111/gwat.12027>.
32. Pande C.B. Sustainable watershed development planning. Part of the Springer briefs in water science and technology book series. Cham: Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47244-3_4.
33. Awais M., Li W., Cheema M.J.M., Hussain S., AlGarni T.S., Liu C., et al. Remotely sensed identification of canopy characteristics using UAV-based imagery under unstable environmental conditions. *Environmental Technology & Innovation*. 2021;22:101465. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101465>.
34. Shum C.K., Guo J.Y., Hossain F., Duan J., Alsdorf D.E., Duan X.J., et al. Inter-annual water storage changes in Asia from GRACE data. In: Climate change and food security in South Asia. Dordrecht: Springer; 2010. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9516-9_6.
35. Famiglietti J.S., Lo M., Ho S.L., Bethune J., Anderson K.J., Syed T.H., et al. Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley. *Geophysical Research Letters*. 2011;38(3). <https://doi.org/10.1029/2010GL0464>.
36. Feng W., Zhong M., Lemoine J.M., Biancale R., Hsu H.T., Xia J. Evaluation of groundwater depletion in North China using the gravity recovery and climate experiment (GRACE) data and ground-based measurements. *Water Resources Research*. 2013;49(4):2110-2118. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20192>.
37. Rodell M., Velicogna I., Famiglietti J.S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*. 2009;460:999-1002. <https://doi.org/10.1038/nature08238>.
38. Scanlon B.R., Longuevergne L., Long D. Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA. *Water Resources Research*. 2012;48(4):1-9. <https://doi.org/10.1029/2011WR011312>.
39. Strassberg G., Scanlon B.R., Chambers D. Evaluation of groundwater storage monitoring with the GRACE satellite: case study of the high plains aquifer, central United States. *Water Resources Research*. 2009;45(5):1-10. <https://doi.org/10.1029/2008WR006892>.
40. Strassberg G., Scanlon B.R., Rodell M. Comparison of seasonal terrestrial water storage variations from GRACE with groundwater-level measurements from the High Plains Aquifer (USA). *Geophysical Research Letters*. 2007;34(14):1-5. <https://doi.org/10.1029/2007GL030139>.
41. Kennedy R.A., Sadeghi P. Hilbert Space Methods in Signal Processing. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. 420 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511844515>.
42. Case K., Kruijzinga G., Wu S.C. GRACE level 1B data product user handbook. Technical report, JPL D-22027, Jet Propulsion Laboratory. Pasadena; 2010.
43. Duan X.J., Guo J.Y., Shum C.K., van der Wal W. On the postprocessing removal of correlated errors in GRACE temporal gravity field solutions. *Journal of Geodesy*. 2009;83:1095-1106. <https://doi.org/10.1007/s00190-009-0327-0>.
44. Shoaib Ali, Dong Liu, Qiang Fu, Muhammad Jehanzeb Masud Cheema, Quoc Bao Pham, Md. Ma-fuzur Rahaman, et al. Improving the resolution of grace data for spatio-temporal groundwater storage assessment. *Remote Sensing*. 2021;13(17):3513. <https://doi.org/10.3390/rs13173513>.
45. Simons F.J., Dahlen F., Wiecezorek M.A. Spatiospectral concentration on a sphere. *SIAM review*. 2006;48(3):504-536.

<https://doi.org/10.1137/S0036144504445765>.
46. Tirkey N., Parhi P.K., Lohani A.K., Chandniha S.K. Analysis of precipitation variability over Satluj Basin, Himachal Pradesh, India: 1901–2013 // *Journal of Water and Climate Change*. 2020. Vol. 12. № 1. P. 127–135. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.136>.
47. Sharma P., Machiwal D., Jha M.K. Overview, current status, and future prospect of stochastic time series modeling in subsurface hydrology. New

York: Elsevier; 2019. p. 133-151. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815413-7.00010-9>.
48. Timbadiya P.V., Mirajkar A., Patel P., Porey P. Identification of trend and probability distribution for time series of annual peak flow in Tapi Basin, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 2013;19(1):11-20. <https://doi.org/10.1080/09715010.2012.739354>.

Информация об авторах

Чупин Виктор Романович,

д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой городского
строительства и хозяйства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: chupinvr@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>

Йоше Агегнеху Китанбо,

преподаватель кафедры охраны
окружающей среды,
Университет Арба Минч,
г. Арба Минч, Почтовое отделение 21, Эфиопия,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: kitanbo@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3792-5854>

Information about the authors

Victor R. Chupin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of the Department of Urban
Construction and Economy,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: chupinvr@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>

Agegnehu K. Yoshe,

Lecturer Department of Water Resources
and Irrigation Engineering,
Arba Minch University,
21 Post Office Box, Arba Minch, Ethiopia,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research
Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: kitanbo@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3792-5854>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 11.01.2023.
Одобрена после рецензирования 23.01.2023.
Принята к публикации 26.01.2023.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 11.01.2023.
Approved after reviewing 23.01.2023.
Accepted for publication 26.01.2023.