

Физическая география и геоэкология

УДК 556.535.2

СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ КРАСНОДАРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ *

О.П. Шевякова¹, С.А. Лебедев^{1,2,3}

¹ Майкопский государственный технологический университет, Майкоп

² Геофизический центр РАН, Москва

³ Почетный профессор Тверского государственного университета, Тверь

Краснодарское водохранилище – крупнейшее на Северном Кавказе водохозяйственный объект комплексного назначения. Вопрос его безопасной эксплуатации – это контроль его нормального подпорного уровня и уровня мёртвого объёма. Для исследования уровня режима водохранилища использовались данные альтиметрических измерений спутников Jason-1/2/3 за 2002-2017 гг., обработка которых проводилась по алгоритму регионального адаптивного ретрекинга. Максимальный среднесезонный уровень воды в водохранилище по данным прямых измерений на гидропосту, расположенного в верхнем бьефе водохранилища, и данным дистанционного зондирования наблюдается в апреле (более 2,4 м), а минимальный – в августе и сентябре (менее 2,4 м). Разница средней за данный временной интервал сезонной изменчивости уровня водоема между данными измерений на гидропосту и данными спутниковой альтиметрии составляет 15,36 см. Результаты расчетов показывают, что межгодовая изменчивость уровня Краснодарского водохранилища за период с 2002 по 2017 гг. составила $+1,5 \pm 0,02$ см/г, что соответствует режиму безопасной эксплуатации водохранилища.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, уровень, Краснодарское водохранилище, региональный адаптивный ретрекинг.

Спутниковая альтиметрия – один из важнейших активных методов мониторинга уровня Мирового океана, позволяющий также проводить оценку ряда сопутствующих гидрометеорологических

* Работа выполнена в рамках государственного задания ГЦ РАН, утвержденного Минобрнауки России (тема № 0145-2019-0004) (подготовка данных) при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-05-41117_РГО_а «Оценка современного гидрологического состояния крупных озер и водохранилищ Восточно-Европейской равнины на основе численного моделирования и новых алгоритмов обработки данных спутникового микроволнового зондирования» (интерпретация и анализ полученных результатов).

параметров пограничных слоев атмосферы и океана: высоты ветровых волн, скорости приводного ветра, отражающих свойств подстилающей поверхности и т.д. Метод спутниковой альтиметрии изначально разрабатывался применительно к условиям открытого моря на расстояниях от берегов не менее 20 км [6, 7, 10, 12, 22], где он обеспечивает заявленную точность измерений.

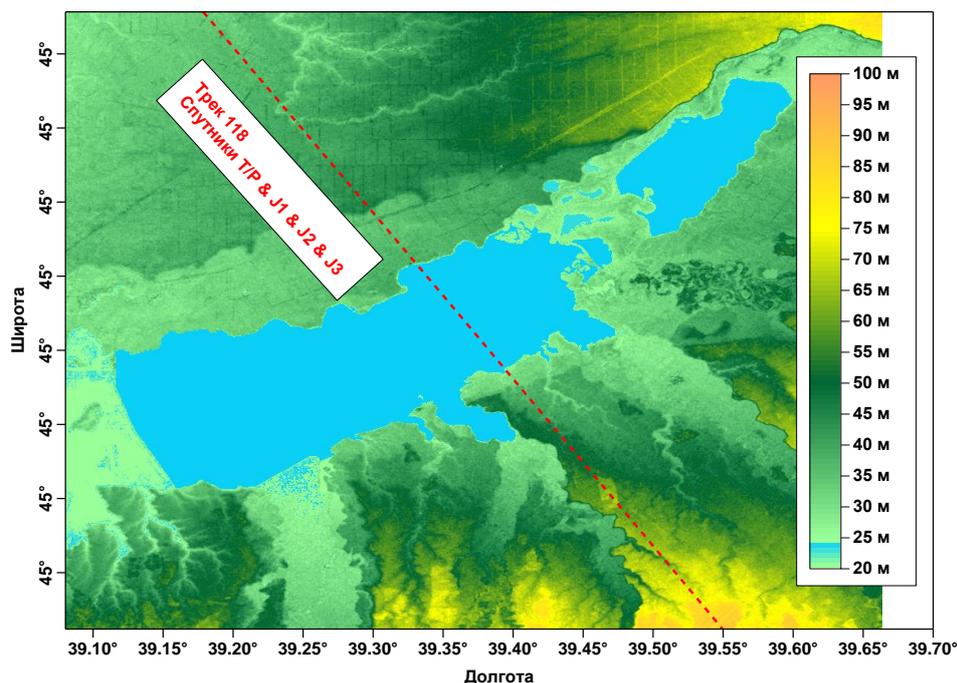
В последние годы данные спутниковой альтиметрии стали активно использовать для мониторинга прибрежной зоны, внутренних водоемов (озер, водохранилищ, крупных рек) и поверхности суши [5, 14, 19, 21].

В настоящее время имеется опыт успешного применения таких измерений для определения топографии ледового щита Гренландии и Антарктиды, шероховатости и толщины снежного покрова [23, 24], а также предлагаются различные методы мониторинга внутренних водоемов: крупных озер, водохранилищ, затопленных территорий, крупных рек [4, 13, 17, 26]. Как показали исследования последних лет, спутниковая альтиметрия дает измерение высоты водной поверхности с точностью до нескольких десятков сантиметров не только для озер, но также и для больших рек типа Амазонки [9, 11] и других рек Южной Америки: Парана, Парагвай и Уругвай [8, 20], а также рек Сибири [18]. Также были проведены исследования гидрологического режима в низовьях Волги в период с января 1992 г. по декабрь 2003 г. с использованием спутниковой альтиметрии, которые показали хорошее согласие с данными наблюдений на гидропостах [2].

Краснодарское водохранилище – крупнейшее на Северном Кавказе, построено в 1973 году и является водохозяйственным объектом федеральной собственности комплексного назначения (противо паводковое, питьевое, рекреационное, для улучшения судоходства и опреснение лиманов, рыборазведения, орошения). За время существования водохранилище предотвратило более 10 крупнейших наводнений, защитив от затопления более 600000 га земель с проживающим в этом регионе полумиллионным населением. Однако длительная эксплуатация Краснодарского водохранилища негативно отразилась на прилегающих к нему землях Республики Адыгея.

Для независимого мониторинга уровня режима Краснодарского водохранилища целесообразно использовать данные дистанционного зондирования – в частности данные спутниковой альтиметрии. Измерения высоты водной поверхности спутниковым альтиметром производятся относительно центра масс Земли, что позволяет исключить вертикальное движение земной коры из межгодового хода изменения уровня. Они не зависят от погоды и проводятся по акватории всего моря. Пространственно-временные масштабы данных спутниковой альтиметрии позволяют исследовать

сезонную и многолетнюю изменчивость уровня Краснодарского водохранилища с высокой точностью.



Р и с. 1. Цифровая модель рельефа территорий, прилегающих к Краснодарскому водохранилищу, по данным радарной топографической съемки SRTM [15, 16, 25]. Положение 118 трека спутников Jason-1/2/3 выделено красной пунктирной линией.

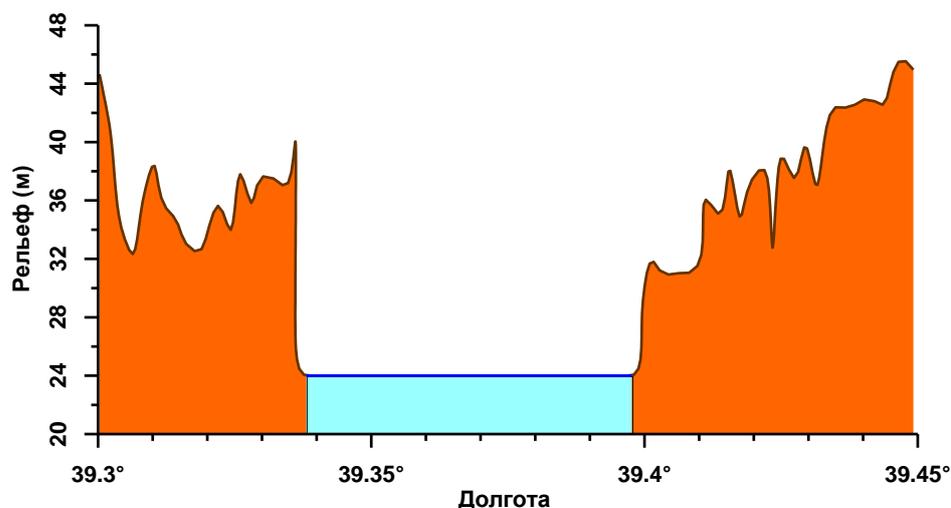
Для исследования изменчивости уровня Краснодарского водохранилища подходят только данные альтиметрических измерений вдоль 118 трека спутников Jason-1/2/3 (рис. 1).

Цифровая модель территории, прилегающей к Краснодарскому водохранилищу

Для построения кусочно-постоянной модели подстилающей поверхности, которая необходима для обработки данных спутниковой альтиметрией алгоритмом регионального адаптивного ретрекинга, требуются данные о положении береговой линии (горизонтальная составляющая часть модели) и высоте берегов (вертикальная составляющая часть модели). Для этого необходима цифровая модель рельефа (ЦМР), территорий, прилегающих к Краснодарскому водохранилищу.

Для формирования таков модели ЦМР был выбран квадрант по долготе $39^{\circ}04'49'' - 39^{\circ}39'48''$ с.ш. и по широте $44^{\circ}48'43'' - 45^{\circ}13'42''$ в.д. В качестве исходной цифровой модели рельефа использовались данные, полученные в результате радарной топографической съемки SRTM (Shuttle

Radar Topographic Mission) с детальностью до 30 м [15, 16, 25] (рис. 1). В исходных данных зеркало водохранилища представлено высотой 24 м.



Р и с. 2. Цифровая модель рельефа вдоль 118 трека спутников Jason-1/2/3, по данным радарной топографической съемки SRTM [15, 16, 25]. Положение зеркала Краснодарского водохранилища (24 м) выделено синей линией.

Изменчивость рельефа вдоль 118 трека спутников Jason-1/2/3 представлена на рисунке 2. Высота береговой линии западной части побережья составляет 37,6 м, а восточной – 30,7 м. Расстояние между берегами составило 6060 м.

Кусочно-постоянная модель подстилающей поверхности для Краснодарского водохранилища и его окрестностей

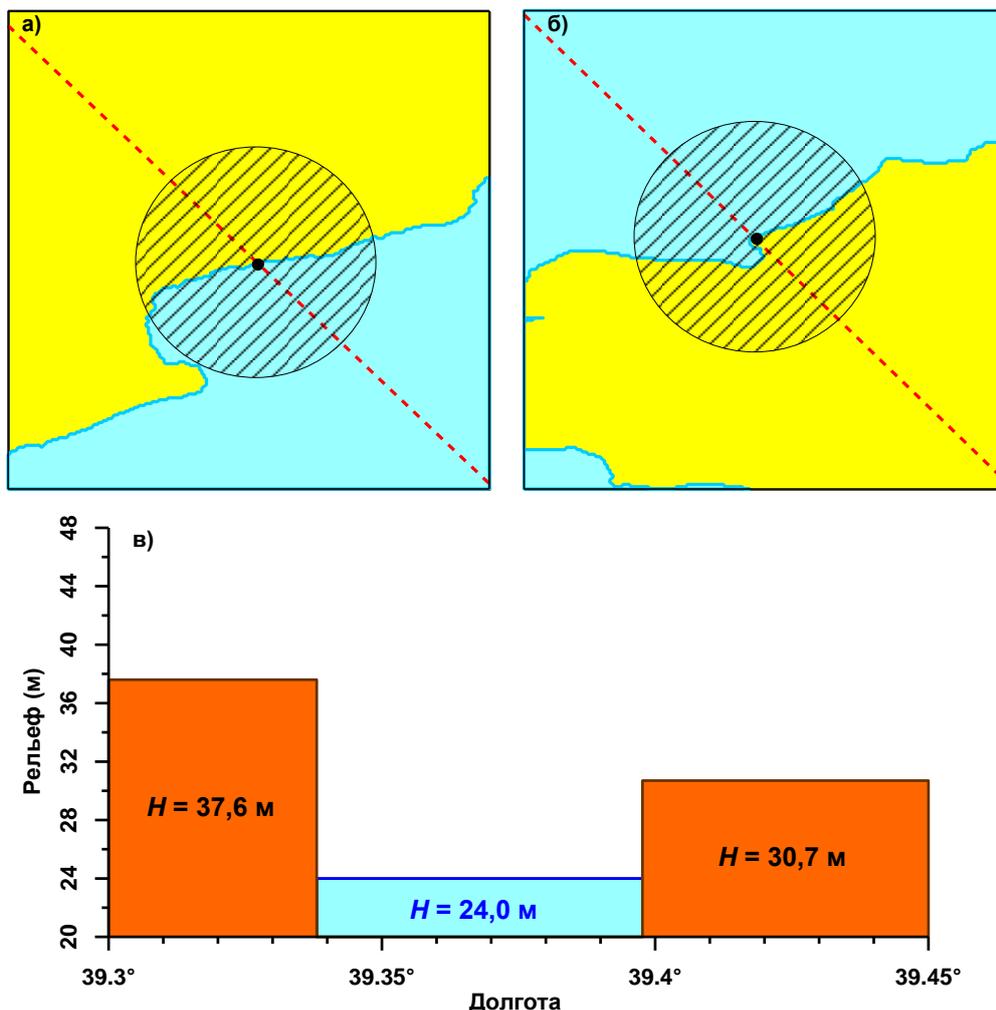
Первым шагом при создании алгоритма ретрекинга является создание упрощенной кусочно-постоянной модели подстилающей поверхности, на основе которой будут производиться расчет теоретических форм, отраженных от нее импульсов.

Горизонтальная составляющая часть модели подстилающей поверхности представлена на рисунках 3а–3б, а вертикальная – на рисунке 3в, где различной заливкой выделены вода и суша.

Метод регионального адаптивного ретрекинга

В данной работе используется алгоритм регионального адаптивного ретрекинга [1, 3], основанный на построении теоретической модели, описывающей формирование телеметрического импульса за счет отражения от кусочно-постоянной модельной поверхности (рис. 3), учитывающей географические особенности региона. На ее основе формулируются критерии отбора телеметрических импульсов и обосновывается применимость порогового и улучшенного порогового

алгоритмов ретрекинга для определения параметров подстилающей поверхности во внутреннем водоеме.



Р и с. 3. Кусочно-постоянная модель подстилающей поверхности для Краснодарского водохранилища: (а–б) – горизонтальная составляющая восточной и западной частей, (в) – вертикальная составляющая. Положение 118 трека спутников Jason-1/2/3 выделено красной пунктирной линией.

Пусть засвеченная (отражающая) поверхность представляет собой совокупность нескольких различных по высоте и отражающим свойствам частей (например, вода, болото, суша и т. п.) – они обозначены различной заливкой на рисунке 3а–3б. Предположим, что ось антенны альтиметра направлена строго в надир ($\xi=0$). В рамках принятых модельных выражений для параметров поверхности и антенны и после

перехода при интегрировании по засвеченной поверхности к полярным координатам форма отраженного импульса принимает вид:

$$P_i(\tau) = \frac{P_0}{\sqrt{2\pi h^4}} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{\sigma^{(0)}(\rho, \varphi)}{s(\rho, \varphi)} e^{-\left(\frac{4}{\gamma} + \alpha(\rho, \varphi)\right) \frac{\rho^2}{h^2}} \times \\ \times \exp\left\{-\frac{(c\tau - 2H(\rho, \varphi) - \rho^2 / h)^2}{8s^2(\rho, \varphi)}\right\} \rho d\rho d\varphi.$$

В случае неоднородной поверхности параметры в этой формуле являются функциями координат. Однако для кусочно-постоянной модели (изображенной на рис. 3) эти параметры постоянны в пределах каждой части поверхности, и интегрирование по каждой отдельной части дает

$$P_k(\tau) = \frac{P_0 \sigma_k^{(0)}}{4\pi h^4} e^{-\left(\frac{4}{\gamma} + \alpha_k\right) \frac{(c\tau - 2H_k)}{h}} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{(c\tau - 2H_k)}{2\sqrt{2}\sqrt{s_k^2 + c^2\tau_i^2}}\right)\right) \times \\ \times \Delta\varphi_k(x_N, y_N, \sqrt{h(c\tau - 2H_k)}),$$

где параметры подробно описаны в работе [3].

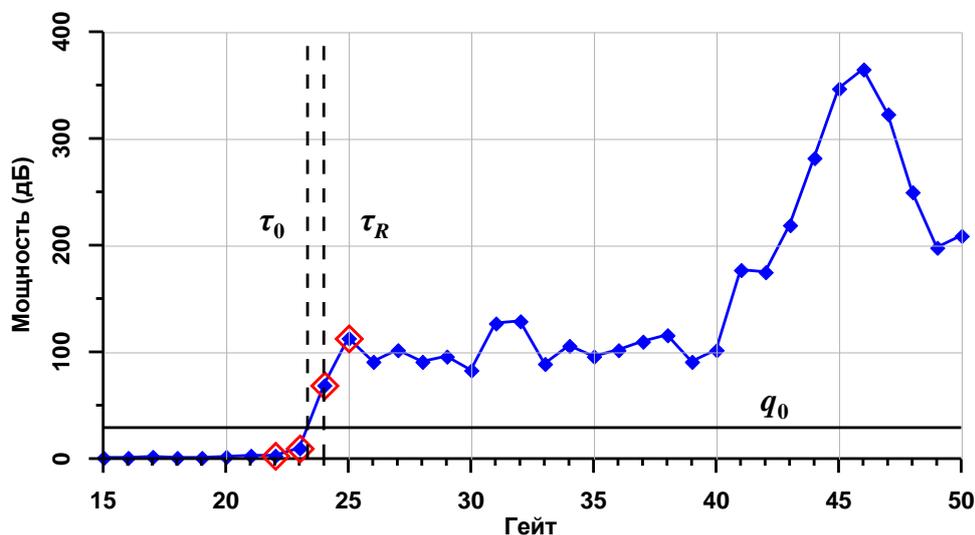
Отраженная мощность, принимаемая антенной альтиметра, представляет собой сумму вкладов в отражение от воды и суши, описываемых формулой:

$$P(\tau) = P_{water}(\tau) + P_{land}(\tau)$$

Анализ теоретической формы отраженных импульсов позволил нам сформулировать критерии отбора: для определения уровня воды следует брать импульсы из части Краснодарского водохранилища, соответствующей 39,34–39,39° в. д., поскольку только в этой области можно надежно выделить сигнал, отраженный от воды. Кроме того, многолетние наблюдения на гидропостах Государственной сети измерений для Краснодарского водохранилища позволяют заключить, что отклонения уровня воды в нижнем бьефе в срок наблюдений от среднего, выходящие за пределы 0,76–6 м относительно нуля поста, следует считать ошибкой.

После определения критериев отбора импульсов предлагается проводить двухшаговую процедуру ретрекинга. На первом шаге (пороговый ретрекинг) грубо определяется точка прихода импульса t_0 по превышению определенного порога $q_0=29$ дБ (рис. 4), затем, на втором шаге (улучшенный пороговый ретрекинг), 4 точки вблизи порога

аппроксимируются функцией ошибок $A \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\tau - \tau_R}{S} \right) \right)$, где параметры A , τ_R , S определяются из алгоритма оптимизации (минимизируются среднеквадратичные отклонения). Возможность аппроксимации переднего фронта части импульса, отраженной от



Р и с. 4. Пример формы отраженного импульса спутника Jason-1 (трек 118 цикл 017 – 27 июня 2002 г.) на рабочей частоте Ku (сплошная прямая – пороговое значение мощности, τ_0 – пороговый ретрекинг, τ_R – улучшенный пороговый ретрекинг).

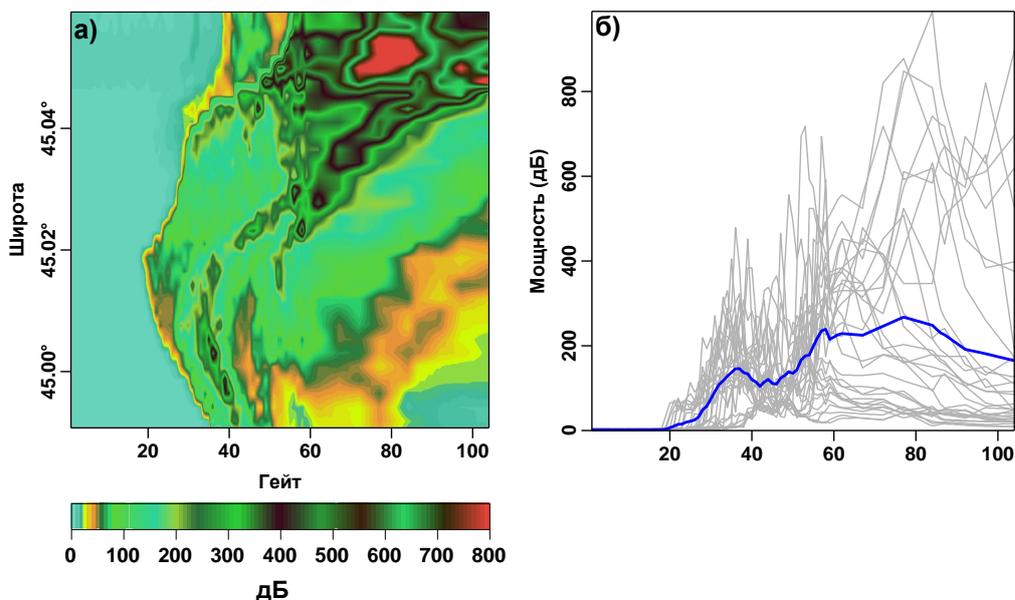
поверхности водоема, функцией ошибок доказана в рамках теоретической модели [1]. Улучшенный ретрекинг дает более точное значение для трековой точки (середины переднего фронта импульса, отраженного водой). Трудности применения данного метода связаны лишь с выбором адекватной процедуры оптимизации. Заметим, что при определении момента прихода импульса с помощью стандартного алгоритма полученная трековая точка помещается в 32-й гейт графика (рис. 4), что приводит к ошибке во времени прихода в 5 гейтов (рис. 5) и ошибке в уровне воды в 3,5 метра.

Результаты изменчивости аномалий уровня Краснодарского водохранилища представлены на рисунке 5.

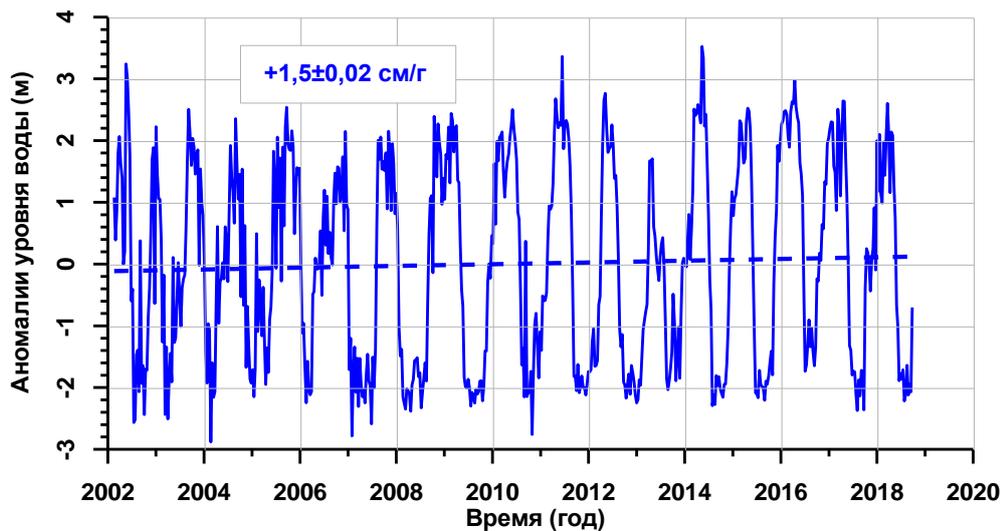
Верификация данных дистанционного зондирования

Верификация результатов расчета уровня Краснодарского водохранилища проводилась по данным гидропоста (<http://gis.water.ru>),

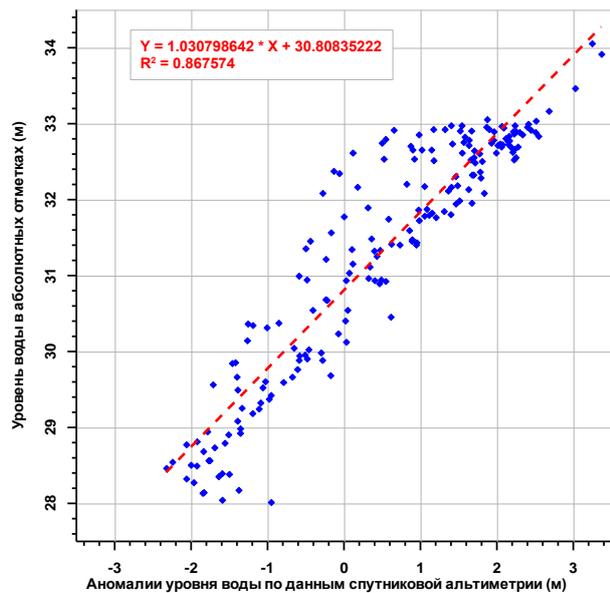
расположенного в верхнем бьефе водохранилища. Несмотря на сильный разброс аномалий уровня воды по данным гидропоста и расчетам по альтиметрическим измерениям коэффициент корреляции между ними составляет 0,9314 (рис. 7). Такой разброс связан с тем, что аномалии уровня воды, рассчитанные по данным спутниковой альтиметрии, определялись как средняя величина для всех измерений вдоль 118 трека за один цикл. На рисунке 5а хорошо видно, что в высота уровня воды сначала снижается вдоль трека по направлению к юго-востоку, а потом опять растет. Этот подъем связан со стоком реки Белая. Именно сток этой реки влияет на такой разброс. Исследование средней сезонной изменчивости уровня Краснодарского водохранилища за 2002–2017 гг. (рис. 8) также показывает хорошее соответствие данных прямых измерений на гидропосту, расположенного в верхнем бьефе водохранилища, и данных дистанционного зондирования. Средняя разница составляет 15,36 см. Максимальная разница более 60,5 см наблюдается в апреле и июле, что связано со стоком реки Белая, который зависит от количества атмосферных осадков на площади ее бассейна.



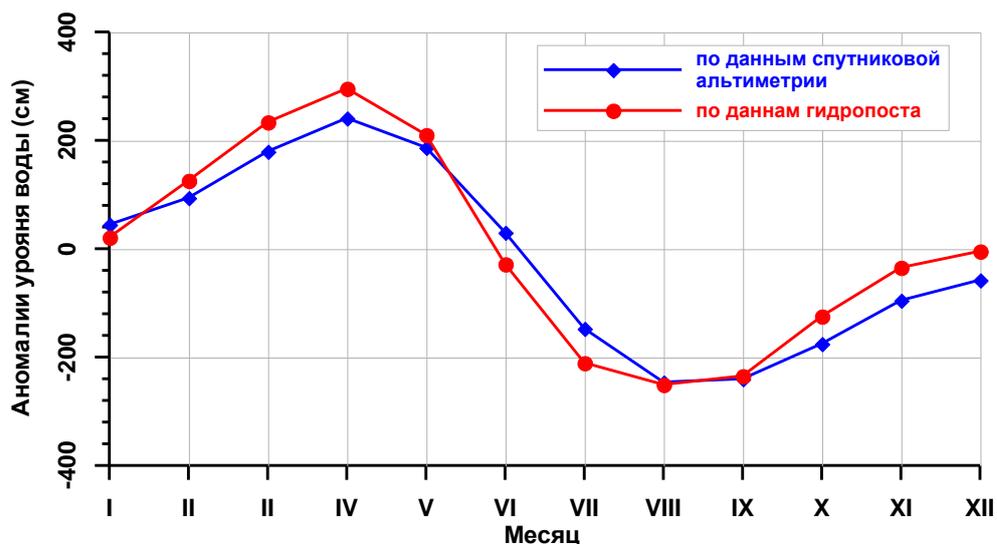
Р и с. 5. Изменчивость мощности (дБ) отраженного от зеркала Краснодарского импульса радиоальтиметра вдоль трека спутника Jason-1 (трек 118 цикл 017 – 27 июня 2002 г.) на рабочей частоте Ku (а) и осредненная за один цикл форма отраженного импульса (б).



Р и с. 6. Изменчивость аномалий уровня Краснодарского водохранилища по данным альтиметрических измерений спутников Jason-1/2/3, обработанных алгоритмом адаптивного регионального ретрекинга.



Р и с. 7. Диаграмма рассеяния аномалий уровня воды по данным спутниковой альтиметрии и данным гидропоста, расположенного в верхнем бьефе водохранилища.



Р и с. 8. Сезонная изменчивость аномалий уровня Краснодарского водохранилища по данным альтиметрических измерений и данным гидропоста, расположенного в верхнем бьефе водохранилища

Анализ полученных результатов

Максимальный среднесезонный уровень воды в водохранилище по данным прямых измерений на гидропосту, расположенного в верхнем бьефе водохранилища, и данным дистанционного зондирования наблюдается в апреле (более 2,4 м), а минимальный – в августе и сентябре (менее 2,4 м). Разница средней за данный временной интервал сезонной изменчивости уровня водоема между данными измерений на гидропосту и данными спутниковой альтиметрии составляет 15,36 см.

Результаты расчетов показывают, что межгодовая изменчивость уровня Краснодарского водохранилища за период с 2002 по 2017 гг. составила $+1,5 \pm 0,02$ см/г, что соответствует режиму безопасной эксплуатации водохранилища.

Заключение

Расчет уровня воды в Краснодарском водохранилище по данным спутниковой альтиметрии в полной мере соответствует измерениям уровня водоема на гидропосту, расположенном в верхнем бьефе. Предлагаемый подход позволяет проводить независимый мониторинг изменчивости уровня водохранилища, а, следовательно, и следить за безопасностью его эксплуатации.

Список литературы

1. Лебедев С.А. Спутниковая альтиметрия в науках о Земле // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. – №. 3. – С. 33–49.

2. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря – М.: Изд. центр. «МОРЕ» Межд. Института океана, 2005. – 366 с.
3. Троицкая Ю.И., Рыбушкина Г.В., Соустова И.А., Баландина Г.Н., Лебедев С.А., Костяной А.Г., Панютин А.А., Филина Л.В. Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов // Водные ресурсы. – 2012. – Т. 39. – №. 2. – С. 169–185.
4. Alsdorf D., Birkett C., Dunne T., Melack J., Hess L. Water level changes in Large Amazon Lake measured with spaceborn radar interferometry and altimetry // Geophys. Res.Lett. – 2001. – V. 28. – № 14. – P. 2671–2674.
5. Anzenhofer M., Shum C.K., Rentsh M. Coastal Altimetry and Applications // Tech. Rep. № 464, Geodetic Science and Surveying. The Ohio State University Columbus, USA. 1999. – 40 p.
6. AVISO/Altimetry. User Handbook. Merged TOPEX/POSEIDON Products. AVI-NT-02-101-CN. Edition 3.0. Toulouse: AVISO, 1996. – 201 p.
7. Barrick, D., Lipa B. Analysis and interpretation of altimeter sea echo // Adv. Geophys. – 1985. – V. 27. – P. 61–100.
8. Birkett C.M. Contribution of the Topex NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands // Water Resour. Res. – 1998. – V. 34. – № 5. – P. 1223–1239.
9. Birkett C.M., Mertes L.A.K., Dunne T., Costa M.H., Jasinski M.J. Surface water dynamics in the Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry // J. Geophys. Res. – 2002. – V. 107. – № D 20. 22 p.
10. Brown, G. The average impulse response of a rough surface and its applications // Antennas and Propagation, IEEE Trans. – 1977. – V. 25. – P. 67–74.
11. Campos I.O., Mercier F., Maheu C., Cochenneau G., Kosuth P., Blitzkow D., Cazenave A. Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon sat-ellite altimetry. Application to the Amazon basin. // Earth and Planetary Sciences. – 2001. – V. 333. – № 10. – P. 633–643.
12. Chelton D.B., Ries J.C., Haines B.J., Fu L.-L., Callahan P.S. Satellite Altimetry // Satellite Altimetry and the Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications / L.-L. Fu.& A. Cazenave (Eds.) – San Diego CA: Academic Press, 2001. – P. 1–131.
13. Cretaux J.-F., Calmant S., Abarca del Rio R., Kouraev A., Bergé-Nguyen M. Lakes studies from satellite altimetry // Coastal Altimetry / S. Vignudelli, A. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. (Eds.) – Berlin,: Springer Verlag, 2010.
14. Deng X., Featherstone W.E. A coastal retracking system for satellite radar altimeter waveforms: Application to ERS-2 around Australia // J. Geophys. Res. – 2006. – V. 111. – 16 p.
15. Digital terrain modelling / R.J. Peckham, G. Jordan (Eds.) – Berlin: Springer, 2007. – 313 pp.

16. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission. // *Rev. Geophys.* – 2007. – V. 45. – №. – RG2004. doi: 10.1029/2005RG000183.
17. Koblinsky C.J., Clarke R.T., Brenner A.C., Frey H. Measurement of river level variations with satellite altimetry // *Water Resources Research.* – 1993. – V. 29. – № 6. – P. 1839–1848.
18. Kouraev A.V., Zakharova E.A., Samain O., Mognard N.M., Cazenave A. Ob' river discharge from TOPEX/Poseidon satellite alimetry (1992–2002) // *Remote Sensing of Environment.* – 2004. – V. 93. – P. 238–245.
19. Legresy B., Papa F., Remy F., Vinay G., van den Bosch M., Zanife O.-Z. ENVISAT radar altimeter measurements over continental surfaces and ice caps using the ICE-2 retracking algorithm // *Remote Sensing of Environment.* – 2005. – V. 95. – P. 150–163.
20. Maheu C.R., Cazenave A., Mechoso C.R. Water level fluctuations in the Plata Basin (South America) from Topex/Poseidon Satellite Altimetry // *Geophys. Res. Letters.* – 2003. – V. 30. – № 3. – P. 1143–1146.
21. Papa F. Legresy B., Remy F. Use of the Topex–Poseidon dualfrequency radar altimeter over land surfaces // *Remote Sensing of Environment.* – 2003. – V. 87. – P. 136–147.
22. Picot N., Case K., Desai S., Vincent P. AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products. // SMM–MU–M5–OP–13184–CN (AVISO). JPL D–21352. Edition 4.1. 2008. – 130 p.
23. Remy F. Legresy B., Bleuzen S., Vincent P., Minster J.F. Dual-frequency Topex altimeter observation of Greenland // *Journal of Electron Waves and Appliance.* – 1996. – V. 10. – P. 1505–1523.
24. Remy F., Schaeffer P., Legresy B. Ice flow physical processes derived from ERS-1 high resolution map of the Antarctica and the Greenland ice sheets // *International Journal of Geophysics.* – 1999. – V. 139. – P. 645–649.
25. Vrscaj B., Daroussin J., Montanarella L. SRTM as a possible source of elevation information for soil-landscape modelling. // *Digital terrain modelling / R.J. Peckham, G. Jordan (Eds.).* – Berlin: Springer, 2007. – P. 99–120.
26. Kostyanoy A.G., Zavalov P.O., Lebedev S.A. What do we know about dead dying and endangered lakes and sea? // *Dying and Dead Seas. Climatic versus Anthropic Causes.* – Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2004. – P. 1–48.

SEASONAL AND INTER-ANNUAL VARIABILITY OF THE KRASNODAR RESERVOIR WATER LEVEL BASED ON SATELLITE ALTIMETRY

O.P. Shevyakova¹, S.A. Lebedev^{1,2,3}

¹ Maykop State Technological University, Maykop

² Geophysical Center RAS, Moscow

³ Professor Emeritus of Tver State University, Tver

The Krasnodar Reservoir is the largest water supply facility in the North Caucasus. The question of its safety operation is the control of its normal retaining level and the level of dead volume. To study the reservoir level regime, altimetry measurements of satellites Jason-1/2/3 were used for 2002-2017, the processing of which was carried out according to the algorithm of regional adaptive retracking. The maximum average seasonal water level in the reservoir according to direct measurements at a hydropost located in the upper pool of the reservoir and remote sensing data is observed in April (more than 2.4 m), and the minimum - in August and September (less than 2.4 m). The difference in the mean water level of the reservoir over the given time interval between the measurement data at the hydropost and satellite altimetry data is 15.36 cm. The calculation results show that the interannual variability in the level of the Krasnodar reservoir from 2002 to 2017 amounted to $+1.5 \pm 0.02$ cm/yr, which corresponds to the mode of safe operation of the reservoir.

Keywords: *satellite altimetry, water level, Krasnodar Reservoir, regional adaptive retracking.*

Об авторах:

ШЕВЯКОВА Ольга Петровна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Лаборатории геоэкологии, геоинформатики и рационального природопользования, доцент кафедры высшей математики Майкопского государственного университета. e-mail: schev-olga@yandex.ru.

ЛЕБЕДЕВ Сергей Анатольевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Геофизического центра РАН и Лаборатории геоэкологии, геоинформатики и рационального природопользования Майкопского государственного университета, почетный профессор Тверского государственного университета, эксперт РАН, e-mail: lebedev@wdcb.ru.