

## ДИНАМИКА ВОДНОЙ МАССЫ МЕРЗЛОТНОЙ ЗОНЫ СРЕДНЕЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ СПУТНИКАМИ GRACE

© 2015 г. С.Т. Им<sup>1,2,3</sup>, В.И. Харук<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН, г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Институт экономики, управления и природопользования Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М.Ф. Решетнёва, г. Красноярск, Россия

<sup>4</sup> Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета, г. Красноярск, Россия

Гравиметрическая съемка GRACE применена для анализа аномалий водного эквивалента массы (АВЭМ) в криолитозоне Средней Сибири. Вариации АВЭМ связаны с осадками, температурой воздуха, потенциальной эвапотранспирацией и составом (дренированностью) почвогрунтов. В динамике АВЭМ выделяются два периода: 2003–2008 гг. – положительный тренд АВЭМ, и 2008–2012 гг., когда на большей части территории происходило снижение величины тренда с одновременным возрастанием (на 30–70 %) дисперсии АВЭМ на фоне роста (до 40 %) вариабельности осадков. Скорость нарастания водной массы положительно коррелирует с содержанием песка и гравия в почвогрунтах ( $r = 0.72$ ) и отрицательно с содержанием глины ( $r = -0.69 \dots -0.77$ ). Для п-ова Таймыр установлен дефицит остаточной водной массы (~250 мм за период 2003–2012 гг.), что указывает на возрастание глубины оттаивания почвогрунтов. В зоне Среднесибирского плато индикатором возрастания таяния вечной мерзлоты (и увеличения мощности активного слоя) служит значимый тренд увеличения водной массы (период 2003–2008 гг.). Установлен тренд роста стока великих сибирских рек – Енисея и Лены в течение 2003–2012 гг.

*Ключевые слова:* криолитозона Сибири, гравиметрическая съемка, GRACE, таяние мерзлоты.

PACS 93.85.Hj, 92.40.-t

### Литература

- Анисимов О.А., Ренева С.А.* Углеродный баланс в криолитозоне России и глобальный климат: современное состояние и прогноз, основанный на моделировании // Полярная криосфера и воды суши: Вклад России в Международный полярный год 2007/2008 / Ред. В.М. Котляков. М.: Paulsen, 2011. 320 с.
- Раковская Е.М., Давыдов М.И.* Физическая география России. М.: Владос, 2001. 304 с.
- Электронный учебник по статистике. М.: StatSoft, 2012. URL: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>
- Barletta V.R., Sørensen L.S., Forsberg R.* Scatter of mass changes estimates at basin scale for Greenland and Antarctica // Cryosphere. 2013. V. 7. P. 1411–1432.
- Bartalev S., Belward A., Ershov D., Isaev A.* Land cover map of the Northern Eurasia based on the SPOT-Vegetation data: Global Land Cover 2000 project. TerraNorte Information System; RAS Space Research Institute. 2004. URL: <http://terranorte.iki.rssi.ru>

- Brown J., Ferrians O.J., Heginbottom J.A., Melnikov E.S.* Circum-arctic map of permafrost and ground ice conditions. Boulder, Colorado, USA: Digital media, 2002. URL: <http://nsidc.org/data/ggd318.html>
- Callaghan T.V., Jonasson S.* Arctic ecosystems and environmental change // *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A.* 1995. V. 352. P. 259–276.
- Chen J.L., Wilson C.R., Tapley B.D.* Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland ice sheet // *Science.* 2006. V. 313 (5795). P. 1958–1960. doi: 10.1126/science.1129007.
- ERDAS Field guide. Norcross: Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC, 2005. 656 p.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC. Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria, 2012. URL: <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML>
- Gardner A.S., Moholdt G., Wouters B., Wolken G.J., Burgess D.O., Sharp M.J., Cogley J.G., Braun C., Labine C.* Sharply increased mass loss from glaciers and ice caps in the Canadian Arctic Archipelago // *Nature.* 2011. V. 473. P. 357–360. doi: 10.1038/nature10089.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H.* Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // *Intern. J. Climatol.* 2013. V. 34 (3). P. 623–642. doi: 10.1002/joc.3711.
- IPCC, 2013: Climate change 2013: The Physical science basis. Contribution of Working group I to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / Eds T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. New York: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
- Koven C.D., Ringeval B., Friedlingstein P., Ciais P., Cadule P., Khvorostyanov D., Krinner G., Tarnocai C.* Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2011. V. 108. N 36. P. 14769–14774. doi: 10.1073/pnas.1103910108.
- Landerer F.W., Swenson S.C.* Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates // *Water Resour. Res.* 2012. V. 48 (4). doi: 10.1029/2011WR011453.
- Landerer F.W., Dickey J.O., Güntner A.* Terrestrial water budget of the Eurasian pan-Arctic from GRACE satellite measurements during 2003–2009 // *J. Geophys. Res.: Atmospheres* (1984–2012). 2010. V. 115 (D23). doi: 10.1029/2010JD014584.
- Muskett R.R.* Modis-derived arctic land-surface temperature trends // *Atmospheric and Climate sci.* 2013. V. 3. P. 55–60.
- Muskett R.R., Romanovsky V.E.* Energy and mass changes of the Eurasian permafrost regions by multi-satellite and in-situ measurements // *Natural Sci.* 2011a. V. 3, N 10. P. 827–836.
- Muskett R.R., Romanovsky V.E.* Alaskan permafrost groundwater storage changes derived from GRACE and ground measurements // *Remote Sens.* 2011b. V. 3 (2). P. 378–397. doi: 10.3390/rs3020378.
- Nghiem S.V., Hall D.K., Rigor I.G., Li P., Neumann G.* Effects of Mackenzie River discharge and bathymetry on sea ice in the Beaufort Sea // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41 (3). P. 873–879.
- Reager J.T., Famiglietti J.S.* Characteristic mega-basin water storage behavior using GRACE // *Water Resour. Res.* 2013. V. 49 (6). P. 3314–3329. doi: 10.1002/wrcr.20264.
- Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A., Vasiliev A.A.* Thermal state of permafrost in Russia // *Permafr. Periglac. Process.* 2010. V. 21. P. 136–155. doi: 10.1002/ppp.683.
- Schuur E.A.G., Abbott B.W., Bowden W.B., Brovkin V., Camill P., Canadell J.G., Chanton J.P., Chapin III F.S., Christensen T.R., Ciais P., Crosby B.T., Czimczik C.I., Grosse G., Harden J., Hayes D.J., Hugelius G., Jastrow J.D., Jones J.B., Kleinen T., Koven C.D., Krinner G.,*

- Kuhry P., Lawrence D.M., McGuire A.D., Natali S.M., O'Donnell J.A., Ping C.L., Riley W.J., Rinke A., Romanovsky V.E., Sannel A.B.K., Schädel C., Schaefer K., Sky J., Subin Z.M., Tarnocai C., Turetsky M.R., Waldrop M.P., Walter Anthony K.M., Wickland K.P., Wilson C.J., Zimov S.A.* Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change // *Climatic Change*. 2013. V. 119. P. 359–374. doi: 10.1007/s10584-013-0730-7.
- Shiklomanov A.I.* River discharge // *Arctic Report Card 2010: Update 2010* / Eds J. Richter-Menge, J.E. Overland. 2010. URL: <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard>
- Sillmann J., Kharin V.V., Zwiers F.W., Zhang X., Bronaugh D.* Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble. Pt. 2. Future climate projections // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2013. V. 118 (6). P. 2473–2493. doi: 10.1002/jgrd.50188.
- Steffen H., Muller J., Peterseim N.* Mass variations in the Siberian permafrost region from GRACE // *Geodesy for planet Earth*. 2012. V. 136. P. 597–603.
- Vaks A., Gutareva O.S., Breitenbach S.F.M., Avirmed E., Mason A.J., Thomas A.L., Osinzev A.V., Kononov A.M., Henderson G.M.* Speleothems reveal 500,000-year history of Siberian permafrost // *Science*. 2013. V. 340 (6129). P. 183–186. doi: 10.1126/science.1228729.
- Velicogna I., Tong J., Zhang T., Kimball J.S.* Increasing subsurface water storage in discontinuous permafrost areas of the Lena River basin, Eurasia, detected from GRACE // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39 (9), L09403. doi: 10.1029/2012GL051623.
- Vey S., Steffen H., Müller J., Boike J.* Inter-annual water mass variations from GRACE in Central Siberia // *J. Geodesy*. 2013. V. 87(3). P. 287–299. doi: 10.1007/s00190-012-0597-9.
- Walsh J.E., Anisimov O., Hagen J.O.M., Jakobsson T., Oerlemans J., Prowse T.D., Romanovsky V., Savelieva N., Serreze M., Shiklomanov I., Solomon S.* Cryosphere and hydrology // *Arctic Climate Impacts Assessment* / Eds C. Symon, L. Arris, B. Heal. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005. P. 183–242.