

Данные LANDSAT 5,7,8 и ЦМР в задаче мониторинга гидрологического режима Капшагайского водохранилища на реке Текес (китайская часть бассейна реки Иле)

А.Г. Терехов^{1,2}, И.Т. Пак¹, С.А. Долгих²

¹ *Институт информационных и вычислительных технологий МОН*

Алматы, 050010, Казахстан

E-mail: aterekhov1@yandex.ru

² *РГП «Казгидромет», Алматы, 050062, Казахстан*

E-mail: svetlana_dolgikh@mail.ru

Гидрологический мониторинг бассейнов трансграничных рек имеет проблемы полноты и представительности информации. Очень часто малодоступна оперативная гидрологическая информация с территории других стран. Спутниковая съемка может обеспечить часть объективной информации о состоянии водных объектов вне зависимости от их территориальной принадлежности. Наиболее интересными гидротехническими объектами являются искусственные водохранилища на реках ледового и снежно-ледового питания с существенными сезонными вариациями объемов хранения воды, построенные после 2000 г. Цифровая модель рельефа SRTM-2000 Elevation для таких водохранилищ представляет собой батиметрию. Мониторинг площади водного зеркала совместно с батиметрией дна водохранилища позволяет рассчитывать суммарный водный баланс системы «река – водохранилище», что способно дополнять гидрологический мониторинг трансграничных бассейнов. На примере бассейна реки Иле (территория Казахстана и КНР) рассмотрен суммарный водный баланс Капшагайского водохранилища, построенного в 2005 г. на реке Текес (КНР). Река Текес, основной приток реки Иле, со средним объемом стока 250 м³/сек, имеет снежно-ледовое питание и формируется в горах внутреннего Тянь-Шаня. На основе 157 снимков LANDSAT-5,7,8 периода 2005–2015 гг. и ЦМР дна определены основные гидрологические характеристики водохранилища и параметры суммарного водного баланса системы «река – водохранилище». Сезонный гидрологический режим объекта формируется изъятием в теплый период из стока реки Текес около одного миллиарда кубометров воды, которая используется для выработки электроэнергии в холодный период. По спутниковым данным, в среднем изымается 10–15% стока реки в период июня – октября, что позволяет на 40% повысить объем стока ноября – апреля.

Ключевые слова: методы дистанционного зондирования, снимки LANDSAT, площадь водного зеркала, гидрологический режим водохранилища, цифровая модель рельефа

Введение

Гидрологический мониторинг бассейнов трансграничных рек имеет проблемы полноты и представительности информации. Особенно актуально эта проблема стоит для стран, расположенных ниже по течению. Например, для бассейна реки Иле (основной приток озера Балхаш, расход воды 480 м³/сек), территория которого относится к юрисдикции Казахстана и КНР. Спутниковая съемка способна обеспечить часть объективной информации о состоянии водных объектов КНР, расположенных выше по течению, и улучшать полноту гидрологического мониторинга трансграничного бассейна.

Наиболее интересными гидротехническими объектами, состояние которых зависит от водности года и может эффективно диагностироваться спутниковой съемкой, являются искусственные водохранилища на реках ледового и снежно-ледового питания. Естественная сезонность в объемах стока таких рек, когда зимний сток значительно меньше летнего, сочетается с гидрологическим режимом работы самого объекта. Все это приводит к существенным сезонным вариациям объемов хранения воды (*рис. 1*).

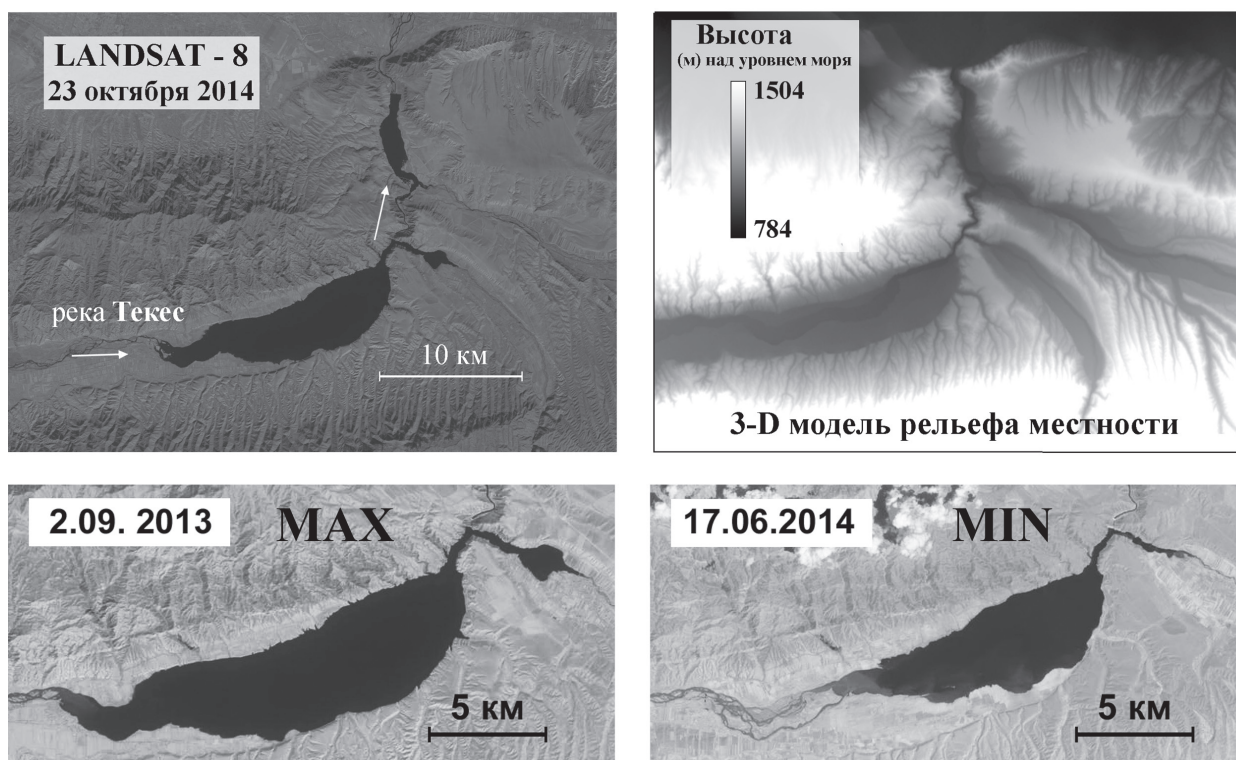


Рис. 1. Фрагменты снимков LANDSAT-8 с Капшагайским водохранилищем на реке Текес (<http://glovis.usgs.gov>) и соответствующая ЦМР местности по данным SRTM-2000 Elevation, гранула 43п-82е

Динамика крупных водных объектов диагностируется на спутниковых платформах путем определения абсолютной высоты водного зеркала, например (Cheinway H., et al., 2005), или через мониторинг водного зеркала (Терехов, 2011). Анализ состояния водохранилищ и параметры суммарного баланса водных потоков в системе «речной сток – водохранилище» могут строиться на основе спутникового мониторинга площади водного зеркала и цифровой модели рельефа (ЦМР) дна. Для территорий, покрытых водой после 2000 г., в качестве батиметрической информации применим продукт SRTM-2000 Elevation, созданный по спутниковым данным до 2000 г.

В верхней, китайской, части бассейна реки Иле одним из крупных гидротехнических объектов является Капшагайское водохранилище (координаты плотины: 43°19' N, 82°29' E), построенное в 2005 г. на реке Текес. Река Текес, основной приток реки Иле, со среднегодовым объемом стока около 250 м³/сек, имеет снежно-ледовое питание и формируется в горах внутреннего Тянь-Шаня. Для Казахских организаций оперативная информация о гидрологических режимах рек внутреннего Тянь-Шаня (КНР) малодоступна. Это делает актуальным применение дистанционных методов диагностики водности сезона. Спутниковый мониторинг суммарного водного баланса между речным стоком и водохранилищем может существенно дополнить информацию о водности рек внутреннего Тянь-Шаня, что важно для прогнозов режима стока реки Иле по территории Казахстана и уровня воды конечного водного объекта – озера Балхаш.

Исходные данные и методы исследования

Анализ состояния водохранилища строился на основе спутникового мониторинга площади водного зеркала и ЦМР дна резервуара (рис. 1). В качестве мониторинговой спутниковой информации привлекалась малооблачная съемка спутников LANDSAT-5,7,8 периода 2005–2015 гг. с пространственным разрешением 30 м. Всего было использовано 157 снимков, сцена WRS-2: path/row 146x30, информация доступна на сайте агентства геологии США (<http://glovis.usgs.gov>). Даты залетов спутников приведены в табл. 1.

Таблица 1. Календарные даты залета использованных спутниковых снимков LANDSAT-5,7,8.

Год	День в течение года
2005	167, 183, 231, 247, 263, 279, 296, 311, 327, 359
2006	106, 154, 170, 186, 202, 210, 218, 234, 242, 250, 274, 282, 298, 346
2007	13, 29, 109, 149, 173, 181, 213, 221, 229, 245, 253, 261, 301, 317, 365
2008	80, 96, 112, 128, 144, 192, 208, 296, 320, 336
2009	2, 66, 82, 114, 130, 138, 146, 170, 178, 202, 226, 234, 258, 274, 282, 290, 298, 346
2010	93, 117, 125, 133, 157, 181, 197, 205, 213, 229, 237, 269, 277, 285, 301, 309, 317, 333, 341
2011	96, 104, 112, 136, 160, 176, 184, 192, 200, 208, 216, 224, 232, 248, 256, 344
2012	91, 107, 171, 219, 235, 251, 267, 283, 315
2013	77, 101, 125, 165, 181, 197, 213, 221, 229, 245, 261, 269, 293, 309, 317, 333
2014	88, 128, 136, 152, 160, 168, 192, 200, 208, 224, 232, 240, 248, 256, 264, 288, 296, 304, 320, 336, 344
2015	83, 107, 123, 131, 139, 147, 155, 163

Данные оптических каналов спутников LANDSAT-5,7,8: канал 2: 520–600 нм; канал 3: 630–690 нм; канал 4: 760–900 нм, могут эффективно использоваться для картирования водных зеркал. Автоматическая, неконтролируемая классификация ISODATA, с делением фазового спектрального пространства на 10–30 максимально удаленных друг от друга классов, способна с высокой точностью выделять водное зеркало. Экспертный контроль над качеством классификации и коррекция ошибок (пропуски и ложные включения) осуществлялась на основе псевдоцветного изображения с формулой RGB-432. Для безоблачной съемки, когда спектральное расстояние между водным зеркалом и окружающей подстилающей поверхностью велико, достаточно 10-классовой кластеризации. При наличии остаточной облачности выделение зеркала водохранилища требует более детальную сегментацию (до 30 классов). В случае значительных помех от облачного покрова водное зеркало выделялось на основе экспертной дешифровки и экстраполяции на основе безоблачной съемки на другие даты с близким уровнем наполненности водохранилища.

Размер компактного водного зеркала водохранилища варьируется в пределах 35–60 тысяч пикселей, из которых около 3% (от 1300 до 1900 пикселей) находятся на периметре. Ошибки классификации формируются порогом отнесения пикселей, расположенных на периметре (граница «вода – суша»), к классу «воды» или «суши». Берега водохранилища в основном песчанно-каменистые, без развитой растительности. Это определяет низкую

зависимость спектральных градиентов границы «вода – суша» от времени сезона и соответственно близкие критерии отнесения к классу «вода» граничных пикселей на всех снимках. Оценить фактическую точность определения площади водного зеркала невозможно без синхронных спутниковых данных, но с существенно лучшим пространственным разрешением. Однако, исходя из общих соображений, изложенных выше, точность определения площади зеркала водохранилища по данным LANDSAT в данном случае существенно лучше 3%.

В качестве ЦМР дна водохранилища использовался продукт SRTM-2000 Elevation с пространственным разрешением 90 м и средней относительной точностью определения высоты над уровнем моря около 1 м (Rodriguez E., et al., 2005). На *рис. 1* для зоны Капшагайского водохранилища (КНП) приведены фрагменты 3-х спутниковых снимков LANDSAT-8 (23.10.2014, 3.09.2013, 17.06.2014) и 3-D модель рельефа местности SRTM-2000 Elevation (фрагмент гранулы 43n-82e). Продукт SRTM-2000 Elevation был создан еще до начала строительства плотины. Поэтому в настоящее время для территории водохранилища ЦМР представляет собой батиметрическую информацию. На основе ЦМР дна водоема были определены взаимосвязи между абсолютной высотой водного зеркала, его площадью и объемом резервуара (*рис. 2*). Для природных объектов, как правило, все эти взаимосвязи имеют однозначный характер. Т.е. величина площади зеркала однозначно определяет его абсолютную высоту и объем воды в резервуаре.

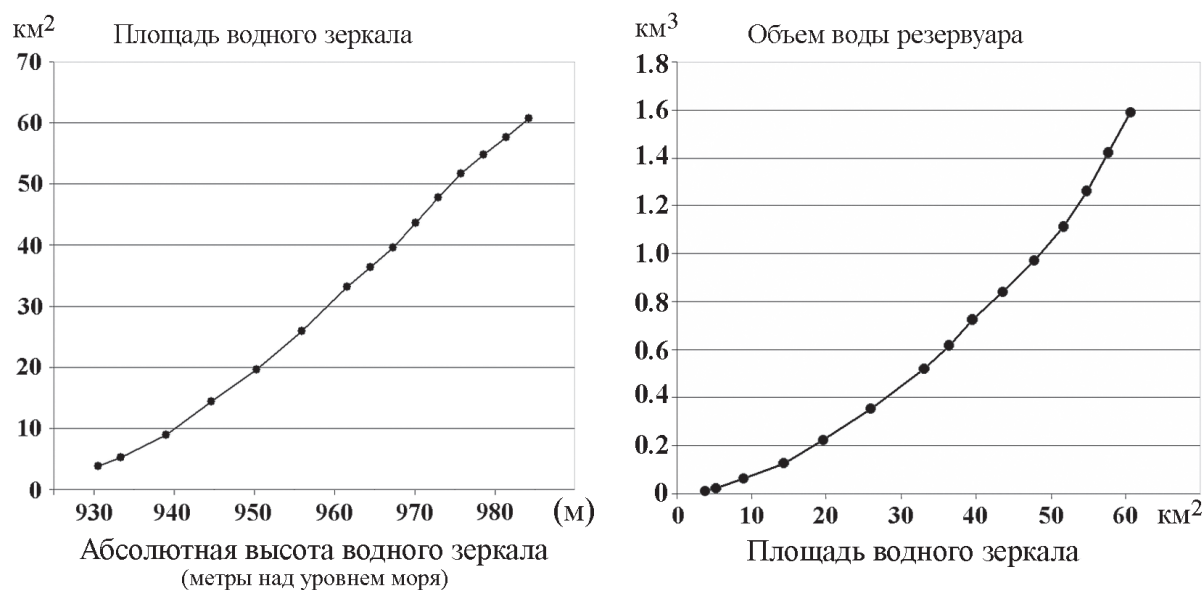


Рис. 2. Взаимосвязи между основными морфологическими характеристиками котловины Капшагайского водохранилища на реке Текес по данным ЦМР (SRTM-2000 Elevation)

ЦМР дна водохранилища являлась основой для перехода от регистрируемой на спутнике площади водного зеркала к оценочному объему запаса воды в Капшагайском резервуаре. В качестве калибровочной кривой взаимосвязи между площадью водного зеркала и объемом воды в водохранилище использовалась соответствующая кривая (*рис. 2*). Таким образом, каждый снимок LANDSAT-5,7,8, пригодный для определения величины площади водно-

го зеркала, продуцировал оценку объема запаса воды в водохранилище. После соотнесения этих оценок к датам залета спутника был осуществлен переход к балансовым характеристикам водохранилища с размерностью $\text{м}^3/\text{сек}$ (рис. 3). При этом формировался архив данных, включающий спутниковые данные площади зеркала и расчетные величины объема воды в водохранилище, а также абсолютную высоту водного зеркала и скорость изменения объема воды в водохранилище $\pm \text{м}^3/\text{сек}$ (между двумя соседними по времени датами залета спутника). Соответственно, чем больше снимков, пригодных для определения площади водного зеркала, доступно для обработки, тем детальнее гидрологический мониторинг. Спутниковая система LANDSAT в климатических условиях верхней части бассейна реки Иле (режим облачности и продолжительность холодного периода с образованием снежно-ледового покрытия, маскирующего водное зеркало) позволяет иметь в течение года от 9 (2012 г.) до 21 (2014 г.) малооблачного спутникового покрытия, пригодного для определения площади водного зеркала.

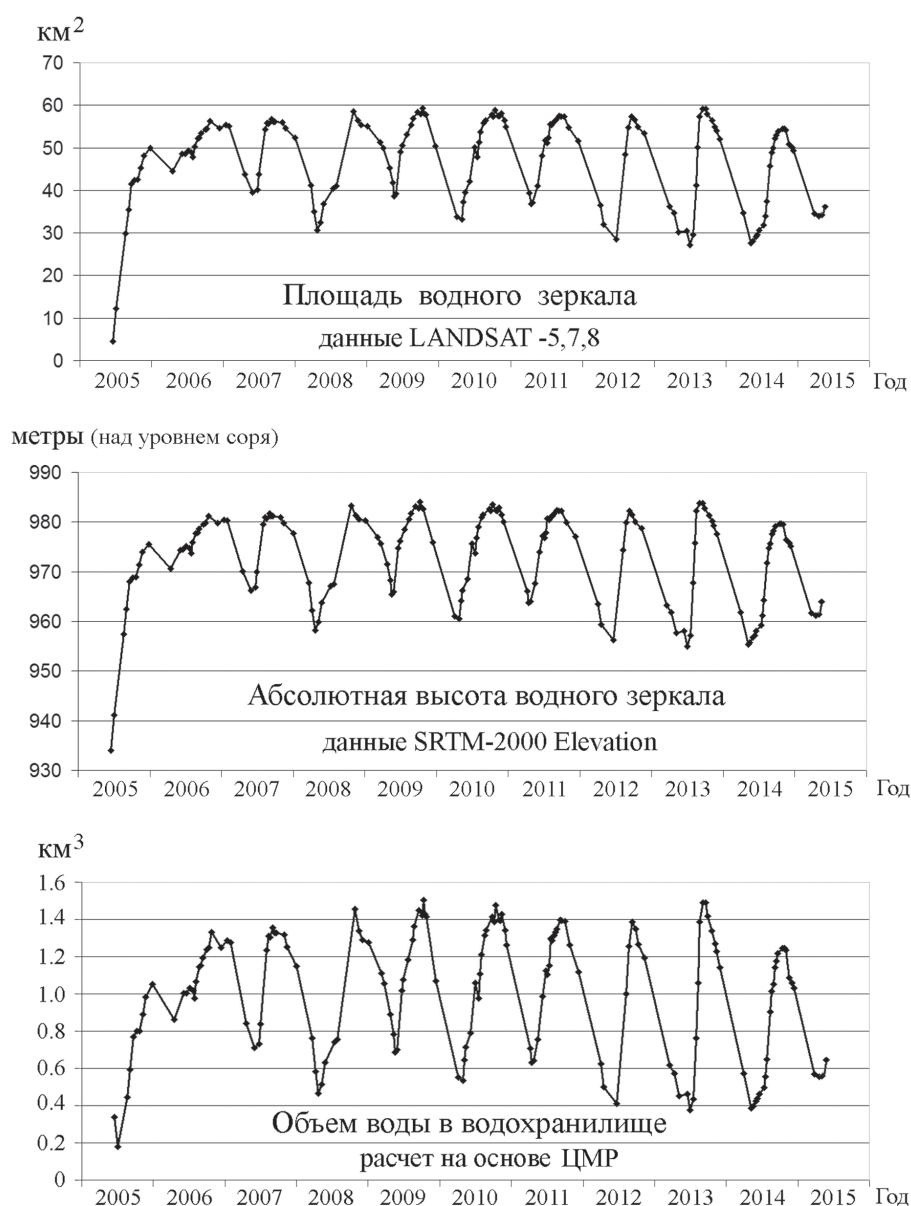


Рис. 3. Мониторинг основных характеристик Капшагайского водохранилища на реке Текес (КНР) в период 2005–2015 гг. Построено на основе спутниковой информации LANDSAT и ЦМР (SRTM-2000 Elevation)

Перепад абсолютной высоты водного зеркала в сезонном цикле «заполнение – опорожнение» водохранилища составляет до 50 м. Относительная точность ЦМР SRTM-2000 Elevation – 1 м. Таким образом, абсолютная ошибка в оценках запаса воды в резервуаре не должна превышать 2–5%, что вполне достаточно для дистанционной диагностики режима работы водохранилища.

Результаты

Капшагайское водохранилище (КНР) в течение годового цикла претерпевает значительные изменения своего размера (*рис. 1*), что может детально регистрироваться на снимках LANDSAT-5,7,8 (разрешение 30 м). Площадь водного зеркала варьируется примерно от 27 до 60 кв. км (*рис. 3*). На основе этих данных была рассчитана динамика суммарного обмена водой между речным стоком и водохранилищем в течение 2005–2015 гг. (*рис. 4*).

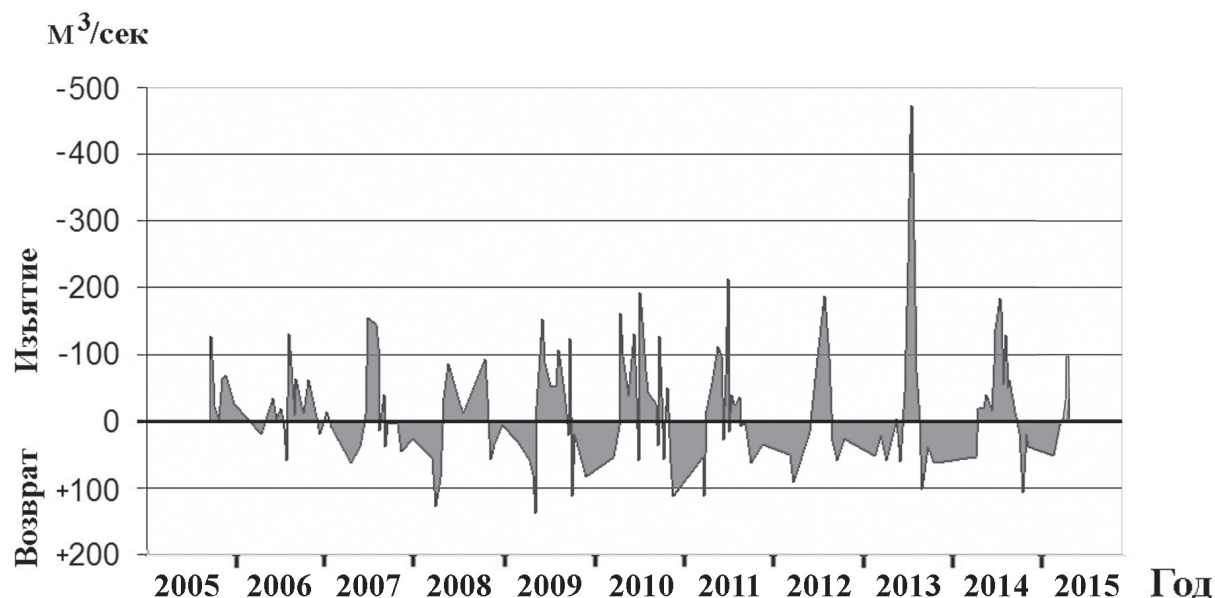


Рис. 4. Суммарный баланс водных потоков между стоком реки Текес и Капшагайским водохранилищем (КНР) в период с 2005 по 2015 гг. по спутниковым данным Landsat 5,7,8

В среднем из речного стока реки Текес в теплый период (июнь – октябрь) в Капшагайское водохранилище изымается около 1,1 млрд. м³ воды (*рис. 3*). Объемы забора воды в течение мая – августа несут в себе информацию о водности года. Можно выделить два режима весенне-летнего заполнения водохранилища (*рис. 5*). Первый – отбор относительно небольших объемов в течение продолжительного времени с начала мая (например, 2010 г.). Данный режим, при прочих равных условиях, наиболее целесообразен в многоводные годы. Второй режим – это вынужденная схема маловодных лет. Маловодье мая и июня не позволяет изымать воду в Капшагайское водохранилище без ущерба для сельского хозяйства, рас-

положенного ниже по течению. Приходится формировать сезонный запас воды в основном в июле – августе, направляя на это существенную часть речного стока (например, режим сезона 2013 г.) (рис. 5).

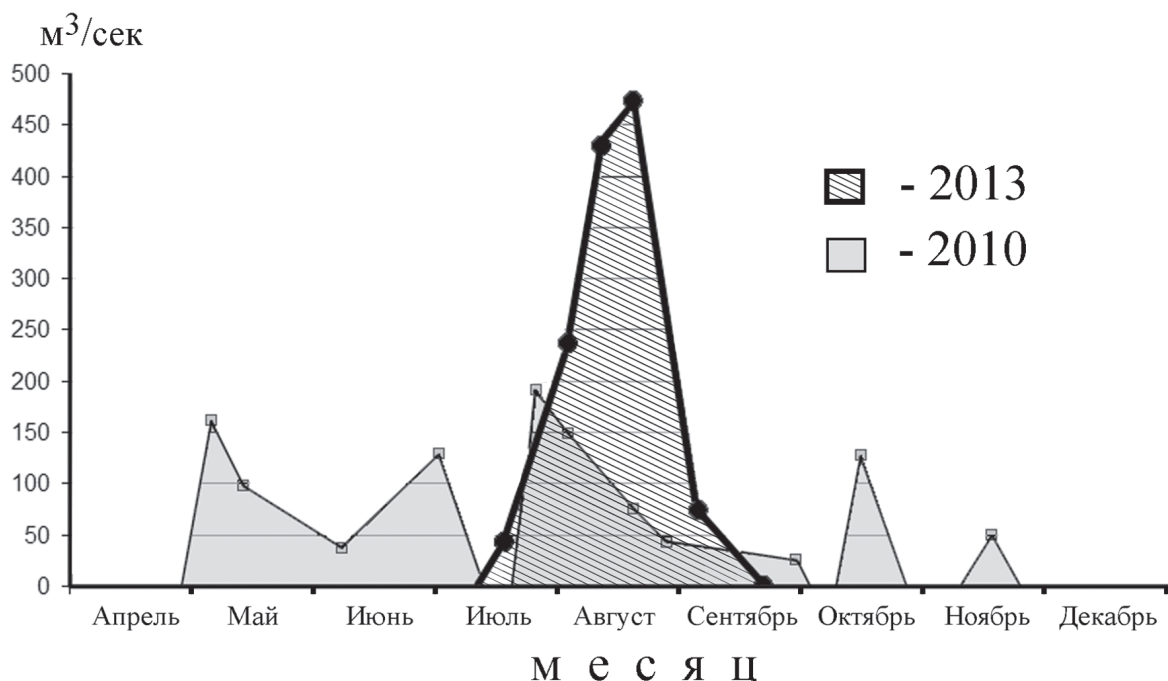


Рис. 5. Режимы изъятия воды из стока реки Текес в Капшагайское водохранилище (КНР) в контрастные по водности годы: 2010 – исключительно многоводный год; 2013 – маловодный год. Построено на основе спутниковой диагностики суммарного водного баланса системы «река – водохранилище»

Рассматривая весну 2015 г., можно отметить, что сезонный минимум запаса воды в водохранилище был пройден на 18 дней раньше средних многолетних условий. Уровень забора воды из речного стока реки Текес в Капшагайское водохранилище в 1–2 декаде мая по спутниковым данным оценивался в 64 м³/сек, что значительно превышает среднее многолетнее значение (15,5 м³/сек) и уступает только исключительно многоводному сезону 2010 г. (97,5 м³/сек). Продолжение существующей тенденции приведет к ранним срокам формирования сезонного максимума запаса воды в водохранилище и обеспечит условия для пропуска воды из реки Текес в сток реки Иле в июле – августе.

Выводы

Крупные гидротехнические объекты на реках ледового и снежно-ледового питания испытывают в течение сезона существенные вариации объемов запаса воды. Для водохранилищ, построенных после 2000 г., 3-D модель рельефа местности (SRTM-2000 Elevation) становится батиметрической информацией. Совместно со спутниковым мониторингом водного зеркала это позволяет дистанционно диагностировать общий водный баланс системы

«речной сток – водохранилище». Такой подход эффективен для гидрологического мониторинга водоемных трансграничных бассейнов, когда недоступна оперативная информация о водности притоков и состоянии гидротехнических объектов, расположенных на территории других стран.

Разработанная методика анализа была протестирована на трансграничном бассейне реки Иле (Казахстан, КНР). Снимки LANDSAT-5,7,8 периода 2005–2015 гг. (157 сцен) Капшагайского водохранилища на реке Текес (КНР) использовались для получения объективной и оперативной гидрологической информации. Информация о текущих запасах воды в водохранилище и водности сезона необходима для прогнозных оценок режима и объема стока реки Иле на территории Казахстана.

Работа выполнена при поддержке грантов министерства образования и науки Республики Казахстан № 2308/ГФЗ, № 0115PK00548.

Литература

1. Терехов А.Г. Спутниковая диагностика уровня воды озер и водохранилищ в районе бассейна реки Иле // Тезисы IX Всероссийской конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: Институт космических исследований РАН, 2011 URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=30 (дата обращения 13.06.2015).
2. Cheinway H., Min-Fong P., Jinsheng N., Jia L., Chung-Hsiung S. Lake level variations in China from TOPEX/Poseidon altimetry: data quality assessment and links to precipitation and ENSO// *Geophysical Journal International*. 2005. Vol. 161. Issue 1. P. 1–11.
3. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W. An assessment of the SRTM topographic products// Technical Report JPL D-31639. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory. 2005. pp.143.

Hydrology monitoring of Kapchagay Reservoir on River Tekes (China's part of River Ile basin) based on LANDSAT 5,7,8 data and DEM bathymetry

A.G. Terekhov^{1,2}, I.T. Pak¹, S.A. Dolgikh²

¹ *Institute of Information and Computing Technology, MES*

Almaty 050010, Kazakhstan

E-mail: aterekhov1@yandex.ru

² *RSB "Kazhydromet", Almaty 050062, Kazakhstan*

E-mail: svetlana_dolgikh@mail.ru

The hydrological monitoring of trans-boundary river basins is often affected by information incompleteness. The access to operational hydrological information on objects located on foreign territory is usually restricted. Satellite data can partly provide independent hydrology information on total basin territory. Artificial reservoirs on rivers with ice and snow/ice supply are of primary interest. These objects are characterized by significant seasonal variations of water storage. The SRTM-2000 Elevation model gives the bathymetry information on the reservoirs built since 2000. DEM reservoir bathymetry and LANDSAT monitoring of water surface can be used for numerical estimation of total water balance between the river runoff and reservoir water storage. This information is an important part of basin hydrological monitoring. For example, River Ile basin (the territory of Kazakhstan and China) was analyzed. River Tekes (the main tributary of River Ile) with average annual water flow of about 250 m³/sec is formed in the Inner Tien Shan Mountains. The artificial Kapchagay Reservoir on River Tekes was built in 2005. In total, 157 images of LANDSAT-5,7,8 (2005–2015) were processed to monitor water surface of Kapchagay Reservoir. The reservoir DEM bathymetry and water area were used to assess total water balance between River Tekes runoff and Kapchagay Reservoir water storage. The seasonal hydrological regime of the reservoir is formed by the withdrawal from River Tekes of more than one billion cubic meters of water, which is used for electricity generation during the cold period. Approximately 10–15% of River Tekes flow is withdrawn during June – October, allowing an increase of about 40% in river runoff in November – April.

Keywords: remote sensing, LANDSAT images, water area, reservoir hydrological regime, digital elevation model

References

1. Terekhov A.G., Sputnikovaiya diagnostika urovnia vody ozer i vodokhranilish v raione basseina reki Ile (Satellite diagnostics of water level of lakes and artificial reservoirs in River Ile basin), *IX konf. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (IX Conf. Current Problems in remote sensing of the Earth from space), Moscow, IKI RAS, 2011, Book of Abstracts, URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=30.
2. Cheinway H., Min-Fong P., Jinsheng N., Jia L., Chung-Hsiung S., Lake level variations in China from TOPEX/Poseidon altimetry: data quality assessment and links to precipitation and ENSO, *Geophysical Journal International*, 2005, Vol. 161, Issue 1, pp. 1–11.
3. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W. An assessment of the SRTM topographic products, *Technical Report JPL D-31639*, Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 2005, pp. 143.