

Терехов А.Г., Долгих С.А.
**Спутниковый мониторинг
гидрологического режима
водохранилища
на реке Текес (китайская часть
бассейна реки Иле)**

На основе 152 снимков LANDSAT-5,7,8 периода 2005-2015 гг. и модели 3D рельефа местности определены основные гидрологические параметры водохранилища на реке Текес, построенного в 2005 году. Площадь водного зеркала резервуара составляет около 50 км², объем воды до 2.7 млрд. м³. Сезонный гидрологический режим объекта формируется изъятием в теплый период из стока реки Текес примерно 1.2 млрд. м³ 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, водность года.

Terekhov A.G., Dolgikh S.A.
**Satellite monitoring of
hydrological regime of artificial
reservoir on river Tekes (China's
part of river Ile basin)**

On base of 152 LANDSAT-5,7,8 images of the period 2005-2015 years and satellite 3D terrain model the main hydrological parameters of artificial reservoir (built in 2005) on the Tekes river were identified. The water surface of the reservoir is about 50 sq.km and water volume does to 2.7 cubic km. The seasonal hydrological regime of this object is formed by the exception about 1.2 billion cubic meters of water from river Tekes runoff during warm period which used to generate electricity during cold times. About 10-15% of the river runoff during June-October is withdrawn that allows for a 40% increase in runoff for the November – April.

Key words: remote sensing methodology, LANDSAT images, water surface area, hydrological regime of artificial reservoir, annual water availability.

Терехов А.Г., Долгих С.А.
**Текес өзенінде орналасқан
су қоймасының гидрологиялық
режимінің спутникалық
мониторингісі
(Қытай жағындағы
Иле өзенінің бассейні)**

2005-2015 жылдар аралығында LANDSAT-5,7,8 пен 3D жер рельефті спутникалық моделінің 152 суреттері бойынша Текес өзенінде 2005 жылы салынған суқоймасының негізгі гидрологиялық параметрлері шығарылған. Суқоймасының су беті көлемінің айнасы 50 км² құрайды, ал су мөлшері 2.7 млрд. м³ жетеді. Объектінің мезгілдік гидрологиялық режимі жылы мезгілде Текес өзенінің ағуынан 1.2 млрд. м³ суды алып, суық мезгілде электроэнергияны шығару үшін қолданылады. Спутникалық мәлімет бойынша судың ағысынан орташалай 10-15% маусым мен қазан аралығында су алынады, бұл 40% қараша мен сәуір аралығындағы су ағысының көлемін көбейтуге көмектеседі.

Түйін сөздер: дистанционды зондтылау әдістері, LANDSAT суреттері, су беті көлемінің айнасы, су қоймасының гидрологиялық режимі, жыл сулылығы.

**СПУТНИКОВЫЙ
МОНИТОРИНГ
ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО
РЕЖИМА
ВОДОХРАНИЛИЩА НА
РЕКЕ ТЕКЕС
(китайская часть
бассейна реки Иле)**

Введение

Гидрологический мониторинг бассейнов трансграничных рек имеет проблемы полноты и представительности информации. Особенно актуально эта проблема стоит для стран, расположенных ниже по течению. Например, в случае Казахстана и бассейна реки Иле. Спутниковая съемка может обеспечить часть объективной информации о состоянии водных объектов, расположенных выше по течению на территории сопредельных стран, и таким образом улучшать полноту гидрологического мониторинга трансграничных бассейнов.

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 площади зеркала и объемов хранения воды. Для крупных водных объектов эта динамика может уверенно диагностироваться на спутниковых платформах либо путем определения абсолютной высоты водного зеркала, например [1], либо через мониторинг положения береговой линии [2].

В китайской части бассейна реки Иле одним из таких объектов является построенное в 2005 году водохранилище на реке Текес (координаты плотины: 43° 19' N, 82° 29' E) с площадью водного зеркала до 57 кв. км, максимальной глубиной в 70 метров и объемом воды до 2.7 млрд. м³. Время заполнения водохранилища 2005-2006 годы; начало эксплуатации с сезона 2007 года. Спутниковый мониторинг водного баланса этого объекта может существенно дополнить информацию о текущем уровне водности сезона для рек внутреннего Тянь-Шаня, что важно для прогнозов режима стока реки Иле по территории Казахстана, состояния Капчагайского водохранилища и уровня озера Балхаш.

Исходные данные и методы исследования

В качестве спутниковой информации использовалась малооблачная съемка спутников LANDSAT-5,7,8 периода 2005-2015 годов с пространственным разрешением 30 м. Всего

привлекалось 152 снимка (сцена WRS-2: path/gow 146x30). Информация доступна на свободной основе на интернет ресурсе министерства геологии США [<http://glovis.usgs.gov>]. Даты залетов спутников использованных снимков приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Календарные даты спутниковых снимков LANDSAT-5,7,8 привлеченных к обработке.

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

Оптические данные спутников LANDSAT-5,7,8: канал 2: 520-600 нм; канал 3: 630-690 нм; канал 4: 760-900 нм; могут эффективно использоваться для распознавания и 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) осуществлялся на основе псевдоцветного изображения с формулой: RGB-432. В случае летних, безоблачных залетов, когда спектральное расстояние между водным зеркалом и окружающей подстилающей поверхностью велико, достаточно 10 классовой кластеризации. Для случаев с остаточной облачностью в холодный период выделение зеркала водохранилища требует более детальной сегментации (до 30 классов). Водное зеркало водохранилища состоит из 40-60 тысяч пикселей, что вполне достаточно для точной оценки его площади без учета граничных эффектов на смешанных пикселях (вода-суша).

Водное зеркало площадью около 50 кв. км является крупным объектом для системы спут-

никовой оценки высоты над уровнем моря. В свободном доступе в Интернете находятся несколько различных систем 3D рельефа местности. Наиболее известная из них SRTM-2000 Elevation с пространственным разрешением в 90 м и средней относительной точностью определения высоты над уровнем моря около 1 м [3]. На рисунке 1 для зоны водохранилища на реке Текес приведен фрагмент спутникового снимка LANDSAT-8 за 23 октября, 2014 года и 3-D модель рельефа местности (SRTM-2000 Elevation, фрагмент гранулы 43n-82e).

Изменение площади водного зеркала и его абсолютной высоты позволяет рассчитывать изменение объема воды хранения (рис.2), и после соотнесения к датам залета спутника переходить к балансовым характеристикам с размерностью [м³/сек], рис.3. При этом формируется архив данных, включающий: площадь зеркала, объем воды в водохранилище, абсолютную высоту водного зеркала, скорость изменения объема воды в водохранилище (\pm м³/сек) с нерегулярным по времени обновлением, привязанным к датам залета спутника. Соответственно, чем больше снимков, пригодных для определения площади водного зеркала, доступно, тем детальнее гидрологический мониторинг. Спутниковая систе-

ма LANDSAT в климатических условиях верхней части бассейна реки Иле (режим облачности и наличие холодного периода с образованием снежно-ледового покрытия маскирующего водное зеркало) позволяет иметь в течение года от 9 (2012) до 21 (2014) малооблачного спутникового покрытия пригодного для обработки.

Результаты и обсуждение

Водохранилище в течение годового сезона претерпевает значительные изменения своего размера, что может детально регистрироваться на снимках LANDSAT (разрешение 30 м). Площадь водного зеркала меняется от 27 до 57 кв. км, абсолютная высота водного зеркала варьируется в пределах 970 – 1000 м над уровнем моря, рис.2. На основе этих данных был рассчитан ряд динамических гидрологических характеристик водохранилища, рис.3.

В среднем из речного стока реки Текес в теплый период (июнь–октябрь) в водохранилище изымается около 1,2 млрд. м³ воды, рис. 2. Режим забора воды в водохранилище в летний период несет в себе информацию о фактической и ожидаемой водности года. При заполнении решается вопрос, когда и сколько воды забирать, чтобы обеспечить потребности территорий ниже по течению и накопить ее необходимый объем к холодному сезону. По данным рисунка 3 можно выделить два режима летнего заполнения водохранилища. Первый, отбор относительно небольших объемов в течение продолжительного времени (например, 2010 год). Первый 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 водохранилище без ущерба для сельского хозяйства, расположенного ниже по течению. Приходится наполнять водохранилище в июле, направляя на это значимую часть речного стока (например, режим сезона 2012 года).

Гидрологический режим водохранилища в сезоне 2014 года был не однозначным. С одной стороны, вода изымалась из стока реки Текес относительно продолжительное время, что указывало на отсутствие проблемы маловодья в раннелетний период. С другой стороны, сезонный максимум накопленной в водохранилище воды был наименьшим с периода ввода его в эксплуатацию (2007 года), рис.2. Недобор составил почти 100 млн. м³ воды, что указывало на маловодье середины и конца лета сезона 2014 года.

Рассматривая начало сезона 2015 года, можно отметить схожую картину. Сезонный минимум объема воды в водохранилище был пройден рано, примерно на 18 дней раньше средних условий. По данным на 3 мая уже регистрировалось увеличение водного зеркала, что указывает на полноводность весеннего стока реки Текес. По всей видимости, будет реализовываться типичный сценарий последних лет. Позднее и активное снеготаяние горных территорий сформирует многоводье весны и первой половины лета, которое затем сменится маловодьем второй половины лета и осени.

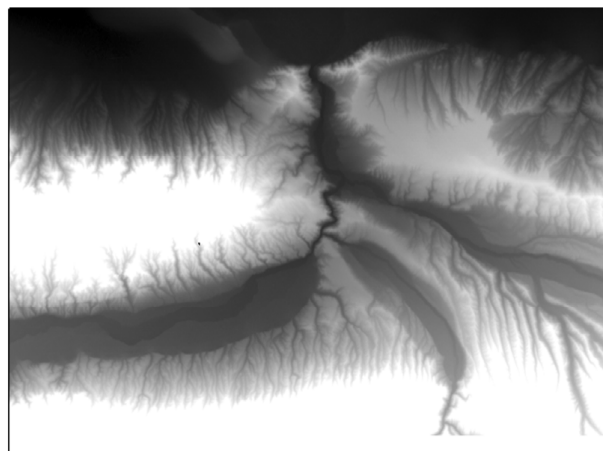
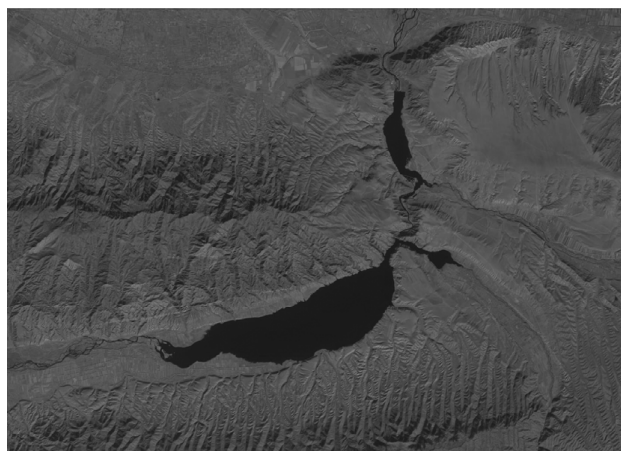


Рисунок 1 – Фрагмент снимка LANDSAT-8 (296 день, 2014) с водохранилищем на реке Текес (исходные данные [<http://glovis.usgs.gov>] и соответствующий 3D-рельеф местности по данным SRTM –Elevation, диапазон шкалы высот: 784-1504 м над уровнем моря)

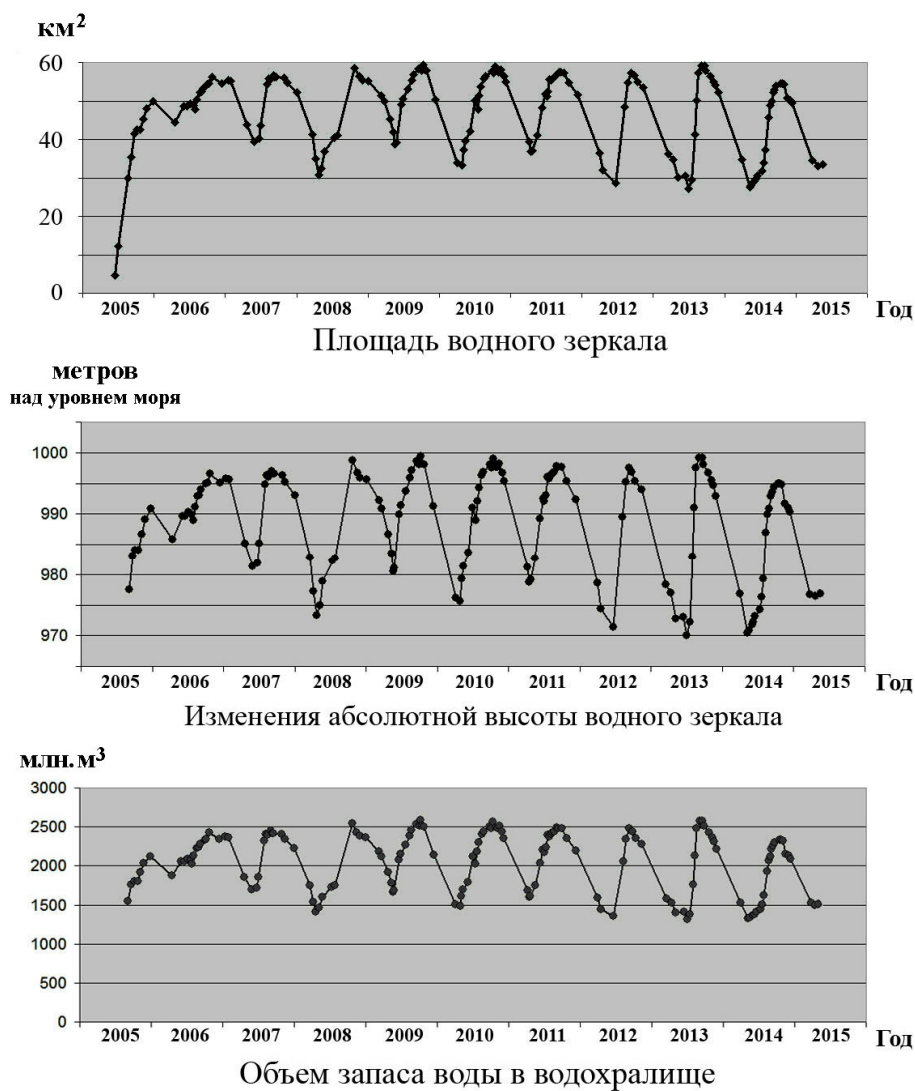


Рисунок 2 – Мониторинг гидрологических характеристик водохранилища на реке Текес в период 2005-2015 гг. Построено на основе спутниковой информации LANDSAT

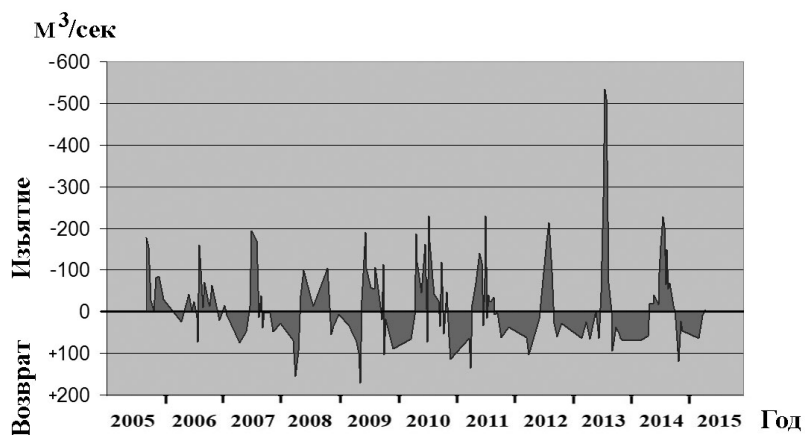


Рисунок 3 – Суммарный баланс водных потоков между стоком реки Текес и водохранилищем в период с 2005 по 2015 годов по спутниковым данным Landsat 5,7,8.

Выводы

Таким образом, спутниковый мониторинг крупных водохранилищ в китайской части бассейна реки Иле на базе снимков LANDSAT-5,7,8 может улучшить полноту и представительность гидрологической информации для этого трансграничного бассейна. Диагностика режима изъ-

ятия воды из речного стока реки Текес и текущий накопленный объем воды в водохранилище позволяют оперативно судить о водности сезона, перспективах пропуска воды в сток реки Иле. Это важно для оценок и прогнозов водности реки Иле на территории Казахстана, состояния Капчагайского водохранилища и уровня озера Балхаш.

Литература

- 1 Cheinway Hwang, Min-Fong Peng, Jinsheng Ning, Jia Luo, Sui Chung-Hsiung Lake level variations in China from TOPEX/Poseidon altimetry: data quality assessment and links to precipitation and ENSO// *Geophysical Journal International*, Vol. 161, Issue 1, March 23, 2005, pp: 1–11.
- 2 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
- 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

References

- 1 Cheinway Hwang, Min-Fong Peng, Jinsheng Ning, Jia Luo, Sui Chung-Hsiung Lake level variations in China from TOPEX/Poseidon altimetry: data quality assessment and links to precipitation and ENSO// *Geophysical Journal International*, Vol. 161, Issue 1, March 23, 2005, pp: 1–11.
- 2 Terekhov A.G. Sputnikovaiy diagnostika urovniya vody ozer i vodokhranilish' v raiyone basseiyna reki Ile// Tezisy IX Vserossiyskoiy konf. «Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa». – М.: Institut kosmicheskikh issledovaniy RAN, 2011 URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=30
- 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