

УДК 556.557

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ СО СНИЖЕННЫМ СТОКОМ ВОДЫ НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА ХАНКА

*Ю.А.Шамилова¹, В.В.Суханова¹, Ю.А.Амельченко¹, А.А.Филей¹,
Е.И.Холодов¹*

¹Дальневосточный Центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», г. Хабаровск, ovr@dvrspod.ru

Аннотация: *в статье представлены результаты анализа морфометрических изменений озера Ханка на основе спутниковых снимков за период 1976-2018 гг. Исследования показали, что за период 2013-2018 гг. динамика морфометрических изменений существенно ускорилась: прирост площади озера увеличился в 5,2 раза, а скорость смещения восточного (российского) берега выросла более чем в 9 раз.*

Ключевые слова: *озеро Ханка, морфометрические изменения, площадь озера, спутниковые изображения, индексные изображения, РОС.*

Актуальность. Озеро Ханка – уникальный природный водоём, расположенный на границе Приморского края (РФ) и провинции Хэйлунцзян (КНР), характеризуется сложным гидрологическим режимом с многолетними циклическими колебаниями уровня, в результате которых площадь водной поверхности озера существенно изменяется. Важным фактором, влияющим на гидрологический режим озера, является антропогенное воздействие на водные ресурсы, наблюдаемое на водосборном бассейне озера в результате развития орошаемого земледелия как с российской, так и с китайской стороны.

Обсуждение результатов. При учете площадей, занятых под те или иные сельскохозяйственные культуры, определении состояния почв, стадий вегетации растений в сельском хозяйстве, в том числе в орошаемом земледелии, активно используются результаты космической съёмки среднего и высокого разрешения, которые несут в себе большую информативность.

Для определения по спутниковым изображениям посадок риса в разных стадиях вегетации, площадей участков пахотной земли для выращивания риса, залитых водой (чеков), рисовых оросительных систем (РОС), связанных с озером Ханка, в Дальневосточном центре НИЦ «Планета» был разработан оригинальный подход, который использует более 10 комбинаций спектральных

индексов, а также пространственно-статистическое распределение признаков объектов разных классов.

Учитывая, что расчёт используемых в работе вегетационных индексов возможен только при наличии определённого перечня спектральных каналов, в исследованиях использовались данные спутниковых приборов Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) и Operational Land Imager (OLI), установленных на космических аппаратах Landsat-5, Landsat-7 и Landsat-8 соответственно, за период с 1976 года по 2018 год. Для анализа было отобрано и обработано более 500 спутниковых сцен указанных съёмочных систем.

Уникальные физические свойства рисовых полей во время их затопления, а также в период созревания риса позволяют проследить динамику изменения индексов растительности, и идентифицировать рисовые поля на фоне других сельскохозяйственных культур.

Для детектирования рисовых полей по спутниковым данным использовались индексы [1]:

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) – нормализованный относительный индекс растительности;

Enhanced Vegetation Index (EVI) – расширенный индекс растительности;

Land Surface Water Index (LSWI) – индекс поверхностных вод.

На основе рассчитанных индексов были синтезированы индексные изображения, на которые поля во время созревания риса отображаются в светло-коричневых и оранжевых тонах. Пример такого изображения представлен на рисунке 1а.

Далее были получены растровые и векторные полигоны РОС и чеков как на китайской, так и на российской территориях бассейна озера Ханка, произведён расчёт, и получены суммарные площади выделенных полигонов. На рис. 1б представлены графики динамики площадей РОС и чеков на территории провинции Хэйлунцзян и динамика площадей РОС на территории Приморского края.

Полученные результаты наглядно отражают устойчивый тренд интенсивного увеличения площадей территорий, используемых под выращивание риса на китайской стороне бассейна озера Ханка, и незначительный тренд к увеличению рисовых полей на российской стороне, наметившийся с 2010 года. Для китайской территории прирост рисовых полей, заливаемых водой, за период 1976-2015 гг. увеличился примерно в 9 раз, что привело к существенному увеличению водообмена с озером Ханка за счет создания сложных технических систем перераспределения водных ресурсов [2].

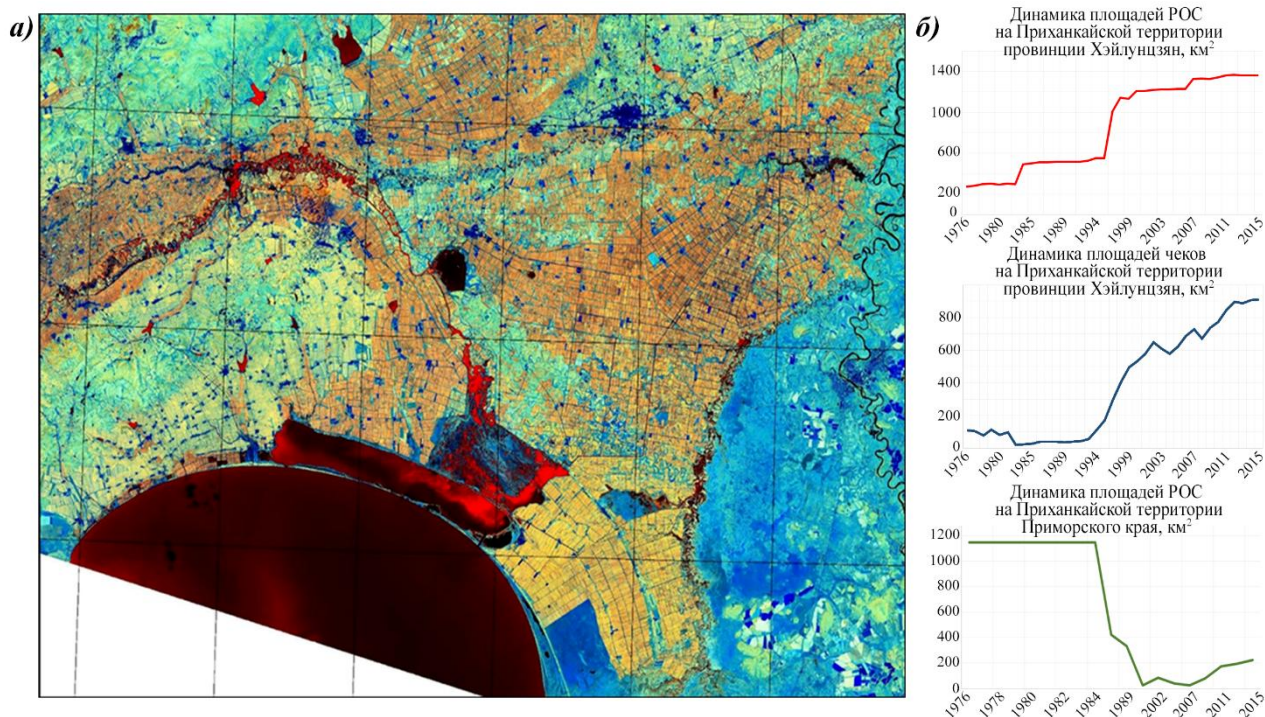


Рис. 1. Идентифицирование рисовых полей и их динамика: а) пример индексного изображения по данным прибора OLI (синтез $R=LSWI$, $G=NDVI/((NDVI+EVI)$, $B=2-LSWI$), за 08.09.2015; б) динамика площадей РОС и чеков на Приханкайской территории.

С российской стороны инфраструктура водохранилищ и гидротехнических сооружений оросительных систем в пределах районов возделывания риса сформировалась до 1976 года, и при анализе не выявлено значительных её изменений.

Несмотря на то, что ведущими факторами, определяющими многолетние изменения уровня озера Ханка, являются климатические, увеличение водообмена, наблюдающееся в результате интенсивного развития орошаемого земледелия на территории КНР, вносит свой вклад в повышение уровня воды. Согласно оценкам [2], общий вклад антропогенных факторов в повышение уровня в настоящий момент составляет 18%.

При анализе морфометрических изменений водных объектов со сниженным стоком воды с использованием спутниковых данных основная задача заключается в оценке изменения площади зеркала в зависимости от различных характеристик водных объектов: уровня воды, соотношения приходной и расходной части водного баланса и т.д. В работе исследовалась зависимость площади зеркала от уровня воды.

Для обнаружения водных объектов на спутниковых изображениях широко используются стандартные водные индексы Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) [3], NDVI, Automated Water Extraction Index

(AWEI) [4] и Water Ratio Index (WRI) [4]. Основным фактором, затрудняющим выделение границы «вода-суша» для озёр (водохранилищ), является отсутствие в большинстве случаев «жестких» берегов. Общеизвестно, что границы озера Ханка не имеют «жестких» берегов с юга и юго-востока озера: берега покрыты зарослями болотной растительности (осокой, камышом, тростником), достигающей высоты 2-2,5 метров, которая при дистанционном зондировании маскирует воду.

Для корректного выделения границ озера на таких участках возникла необходимость комбинировать водные и вегетационные индексы. Для выделения площади «чистого» зеркала озера использовались указанные выше водные индексы, для маскированных растительностью участков – комбинированные индексные изображения, удовлетворяющие условию:

$$(NDVI+EVI)/2-LSWI<0,2.$$

В результате обработки для каждого из исследуемых спутниковых изображений были получены векторные и растровые слои полигонов участков, принадлежащих разным классам.

Таким образом, были выделены полигоны открытой водной поверхности и воды, маскированной болотной растительностью, и получены численные значения площадей полигонов. Полная площадь акватории озера складывалась из площади открытой поверхности воды озера («чистое» зеркало) и площади участков воды, маскируемой растительностью.

Зависимость полной площади акватории озера от его уровня воды показана на рис. 2а. За период с 2013 по 2018 гг. прирост площади озера ускорился в 5,2 раза – рисунок 2б.

Кроме того, было выявлено значительное размывание и смещение восточного берега озера Ханка в сторону суши. Величина смещения оценена по семи точкам за периоды 1989-2018 гг., 1989-2012 гг. и 2013-2018 гг. (рис. 3).

Важно отметить, что скорость «отступления» берега после 2013 года выросла более чем в 9 раз.

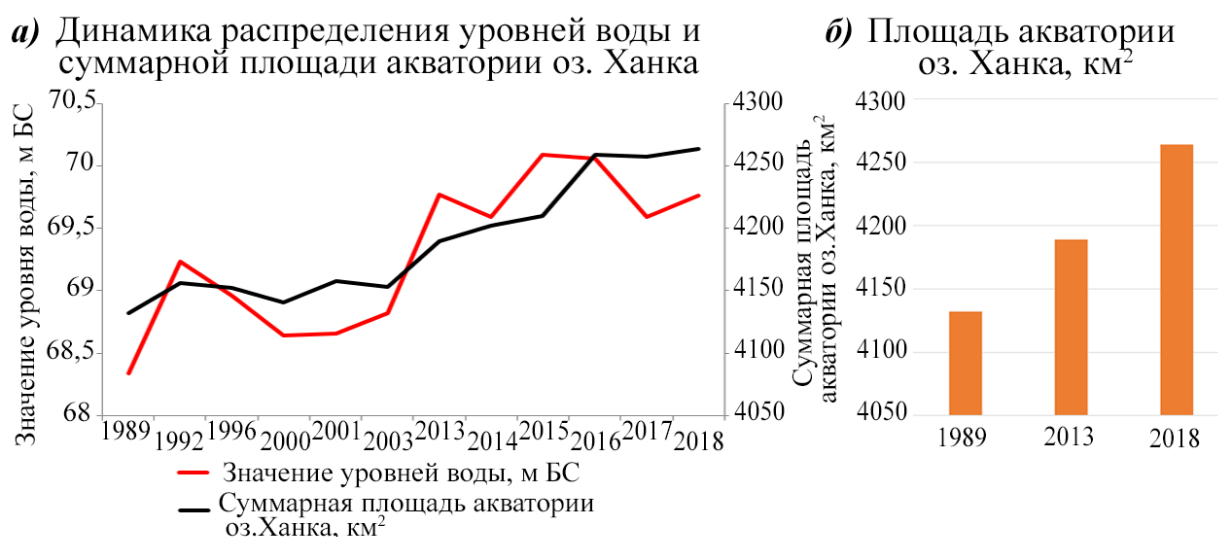


Рис. 2. Зависимость площади акватории озера от уровня воды: а) график динамики распределения уровней воды и суммарной площади акватории оз. Ханка; б) график площади оз. Ханка в 1989, 2013 и 2018 гг.

В ходе работы было отмечено, что при значительном росте уровня воды в озере наблюдается затопление расположенных на низменных восточном и южном побережьях водно-болотных угодий (ВБУ), которые характеризуются наличием травянистых влажных лугов с участками открытой воды, называемых плавнями. Повышение уровня воды в озере приводит к перемещению плавней по открытой поверхности воды, что хорошо прослеживается на последовательности спутниковых изображений. Очевидно, что если плавни перемещаются, то под ними достаточный для этого уровень воды. Перемещения плавней в водно-болотных угодьях наблюдаются, начиная с 2013 года. В предыдущие годы на спутниковых изображениях перемещений не наблюдалось.

Были выделены контуры ВБУ с достаточно высоким уровнем воды для определения в этих полигонах поверхности классов «вода» и «вода, маскированная болотной растительностью», произведен расчет и получены их суммарные площади на участках ВБУ.

Роль ВБУ в формировании площади зеркала, а также степень взаимодействия уровня воды озера Ханка и прилегающих к ней ВБУ необходимо изучать дополнительно.

Применяемые подходы позволили выделить характерные РОС и рисовые чеки, заливаемые водой, и провести исследования динамики многолетних антропогенных изменений на Приханкайской территории. Полученные результаты наглядно отражают устойчивый тренд увеличения площадей территорий, используемых под выращивание риса на китайской стороне

бассейна озера Ханка, и незначительный тренд к увеличению рисовых полей на российской стороне, наметившийся с 2010 года.

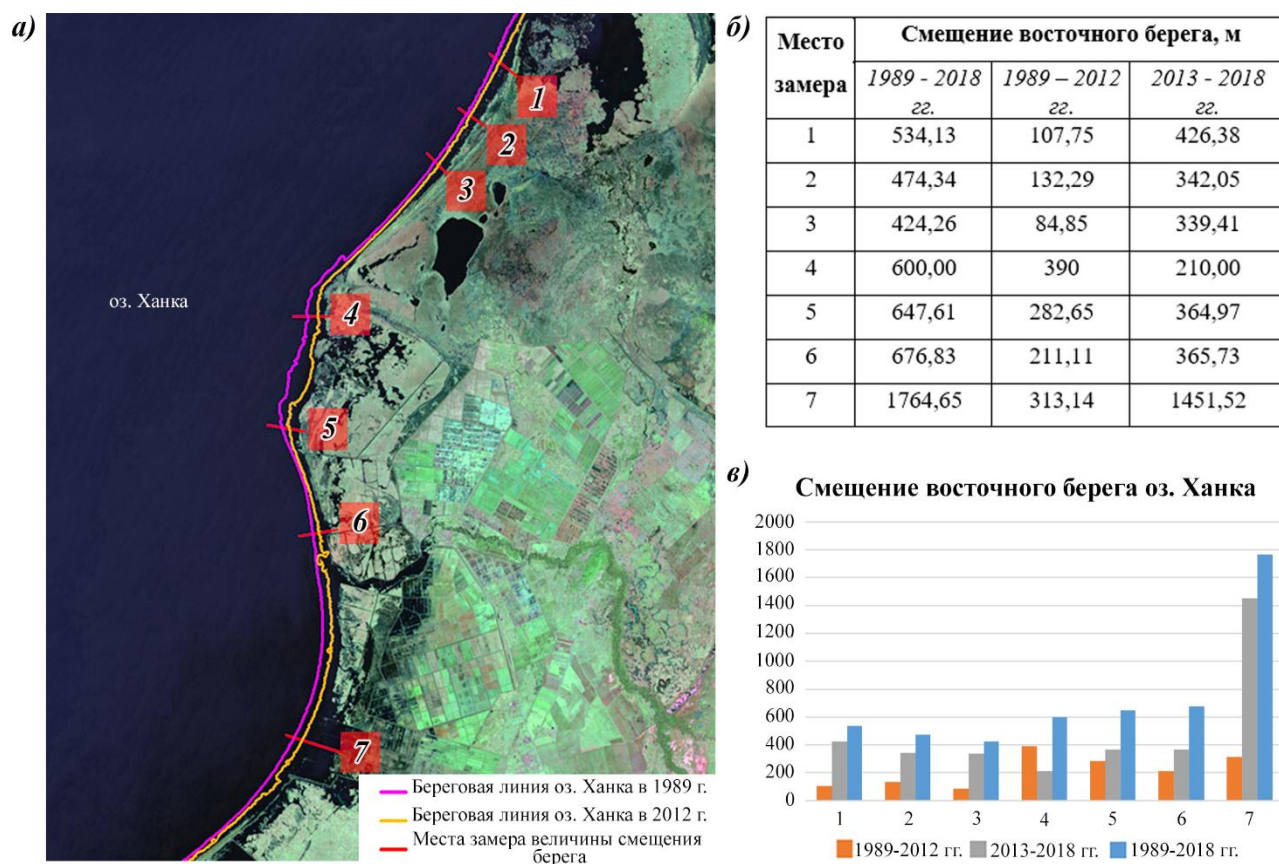


Рис. 3. Смещение восточного берега озера Ханка в сторону суши: а) наложение береговых линий озера Ханка за 1989 и 2012 гг. на спутниковое изображение с космического аппарата Landsat-8 за 16.09.2018, синтез в «естественных» цветах; б) таблица значений величины смещения восточного берега озера Ханка; в) гистограмма распределения смещения восточного берега озера Ханка.

Акватория озера в исследованный период претерпевает значительные изменения, площадь зеркала озера неуклонно растет. До 2015 г. рост уровней воды коррелирует с ростом площади зеркала озера. После достижения наивысшей отметки уровня в 70,09 м БС в 2015 г., что превышает исторический максимум, корреляция уровней и площади озера не наблюдается. Сравнительный анализ показал, что площадь озера в настоящее время существенно больше, чем при аналогичных значениях уровней воды до 2015 г. Также выявлено ускорение динамики морфометрических изменений озера Ханка: за период 2013-2018 гг. прирост площади озера ускорился в 5,2 раза, а скорость смещения восточного (российского) берега выросла более чем в 9 раз.

Стоит дополнительно отметить, что сильным изменениям подвергся не только восточный берег озера, но и теряющиеся среди болотной растительности ВБУ, изменения которых необходимо изучать дополнительно.

В последующие годы вплоть до настоящего времени продолжается постепенное увеличение площади озера Ханка. Причем по визуальным оценкам значительные изменения происходят не только в акватории самого водоема, но и на близлежащих территориях с восточной и юго-восточной стороны.

В исследованиях последних лет большое внимание уделяется анализу современного состояния гидрологического режима озера, связанного с колебаниями уровня воды. Материалы космической съемки позволяют осуществить комплексный системный подход к изучению пространственно-временных закономерностей влияния естественных и антропогенных факторов на морфометрические характеристики как самого озера, так и его бассейнового водосбора в целом, сокращая время на ознакомление со всей исследуемой территорией и позволяя решить проблему сопоставления данных, обработанных единовременно и с применением единого подхода.

Заключение. Исследования морфометрических изменений озера Ханка с учетом накопленных материалов космической съемки в Дальневосточном центре продолжаются. Особый интерес представляет не только увеличение площади его зеркала, но и перелив воды из озера и затопление окрестных ВБУ и полей на российской территории, наблюдаемые на спутниковых изображениях. Результаты оценок выявленных морфометрических изменений за период 2019-2023 гг. будут опубликованы в рамках последующих конференций.

Библиографический список

1. Qin Y., Xiao X., Dong J., Zhou Y., Zhu Z., Zhang G., Du G., Jin G., Kou W., Wang J., Li X. Mapping paddy rice planting area in cold temperate climate region through analysis of time series Landsat 8 (OLI), Landsat 7 (ETM+) and MODIS imagery // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 105. – pp. 220-233.
2. Георгиевский В. Ю., Шалыгин А. Л., Болгов М. В., Коробкина Е. А. Многолетние изменения уровня озера Ханка и проблемы его регулирования // Водное хозяйство России. – 2017. – №3. – С. 69-88.
3. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // Int. J. Remote Sens. – 2006. – Vol. 27. – pp. 3025–3033.

4. Rokni K., Ahmad A., Selamat A., Hazini S. Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery // Remote Sens. – 2014. – Vol. 6. – pp. 4173-4189.

SATELLITE MONITORING OF MORPHOMETRIC CHANGES IN WATER BODIES WITH REDUCED WATER FLOW USING THE EXAMPLE OF LAKE KHANKA

I.A. Shamilova¹, V.V. Sukhanova¹, I.A. Amelchenko¹, A.A. Filey¹, E.I. Kholodov¹
¹Far-Eastern Center of the Federal State Budgetary Institution «State Research Center of Space Hydrometeorology «Planeta», Khabarovsk, ovp@dvrpod.ru

Summary: The paper presents the results of morphometric changes analysis in Lake Khanka based on retrospective satellite images from 1979 to 2018. Research has shown that the dynamics of morphometric changes accelerated significantly for 2013-2018: the accretion in the area of the lake increased by 5.2 times, and the offset speed of the eastern (Russian) shore increased by more than nine times.

Keywords: Lake Khanka, morphometric changes of the lake, satellite images, index images.