

Оценка динамики состояния природных комплексов побережья озера Большое Топольное (Алтайский край) с помощью временного ряда многоспектральных данных различного разрешения

А. В. Головин, Н. В. Стоящева, Н. М. Ковалевская

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия
E-mail: golovin.anton.vl@gmail.com*

Представлены результаты оценки динамики состояния природных комплексов побережья оз. Бол. Топольное дистанционными методами на основе изучения разновременных космических снимков (Sentinel-2, Landsat-5, Landsat-7) различного разрешения. Выполнены расчёты вегетационных индексов (NDVI, SAVI, MSAVI2, WAVI), параметрическая и непараметрическая классификация для побережья оз. Бол. Топольное за 1990, 2000, 2010, 2019 гг. в программе Erdas Imagine. Установлено, что в течение нескольких лет акватория и побережье оз. Бол. Топольное подвержены зарастанию околородной и кустарниковой (лох узколистный) растительностью, что может негативно сказываться на природных системах, обладающих богатым природно-ресурсным потенциалом для развития туристической деятельности. С 2000 по 2019 г. на побережье озера наблюдается увеличение применяемых индексов с 0,4–0,6 до 0,7–0,8 на небольших участках распространения околородной растительности и с 0,7–0,8 до 0,8–1,0 — на крупных участках. Непараметрическая классификация по 20 классам показала увеличение площади зарастания с 1 до 2,3 км². Кустарниковая растительность распространена на восточном, юго-восточном и южном побережье озера, значение индексов на этих участках с 2010 по 2019 г. увеличиваются с 0,4–0,6 до 0,7–0,8. Параметрическая классификация показала увеличение площади зарастания с 0 км² (2000) до 0,6 км² (2019). Интенсивное зарастание озера околородной растительностью связано с колебанием уровня озера, кустарниковой растительностью — с использованием лоха узколистного в защитных лесополосах степной части края, снижением уровня эксплуатации озера в рыболовных целях и уменьшением поголовья крупного рогатого скота в Бурлинском р-не.

Ключевые слова: озеро Бол. Топольное, дистанционное зондирование Земли, Sentinel-2, Landsat-5, Landsat-7, вегетационные индексы

Одобрена к печати: 16.03.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-166-173

Введение

Озеро Бол. Топольное — крупнейший водоём Бурлинской озёрной системы, приуроченной к нижнему течению р. Бурлы. Изучение экологического состояния озера, как и других водных объектов бассейна р. Бурлы, играет важную роль в поддержании экологического каркаса территории Бурлинского р-на и развитии туристической отрасли как одного из приоритетных направлений социально-экономического развития Алтайского края.

Одним из индикаторов экологического состояния водоёмов выступает зарастание их акваторий водной и околородной растительностью, которое наблюдается на пресных озёрах бассейна р. Бурлы, в том числе на оз. Бол. Топольное. Изучению развития высшей водной растительности в пределах Бурлинской озёрно-речной системы посвящены работы Е. Ю. Зарубиной и М. И. Соколовой (2017, 2018).

Для оз. Бол. Топольное также характерно зарастание восточного побережья лохом узколистным (*Elaeagnus angustifolia* L.), который внесён в Чёрную книгу флоры Сибири (Чёрная..., 2016) как злостный сорняк. Данный вид использовался в защитных лесонасаждениях в степной части Алтайского края начиная с 20-х гг. прошлого века, на современном этапе он образует собственные сообщества, становясь в них доминантом и содоминантом. Биологами Алтайского государственного университета (Шибанова и др., 2013) произрастание лоха узко-

лиственного на восточном берегу оз. Бол. Топольное отмечалось в 2012 г., авторы характеризуют его как чужеродный инвазивный вид, угрожающий местному биоразнообразию.

Объект, материалы и методы исследования

Озеро Бол. Топольное расположено на крайнем северо-западе Алтайского края на территории Бурлинского р-на, недалеко от границы с Казахстаном. Входит в группу проточных озёр нижнего течения р. Бурлы. В зависимости от гидрологического режима бассейна р. Бурлы длина озера изменяется от 14 до 16 км, ширина — от 7 до 9 км; при средней глубине водоёма 1,2 м максимальная (зафиксирована в 2010 г.) может составлять 4,5 м; площадь водного зеркала колеблется от 76 до 127 км². Для озера характерен бордюрный тип зарастаемости макрофитами, т.е. вдоль береговой полосы формируется пояс тростника с рогозом узколистным, камышом, рдестами (Зарубина, Соколова, 2017).

Оценка динамики состояния побережья оз. Бол. Топольное базировалась на применении разновременных космических снимков, полученных многозональными сканирующими системами высокого (Sentinel-2) и среднего (Landsat-5, -7) разрешения за конец июня 1990, 2000 гг., середину и конец августа 2010, 2019 гг. (таблица).

Пространственное разрешение спутников Sentinel и Landsat достаточно для обнаружения зарастания водоёмов растительностью большой площади, однако ограничивается их спектральным разрешением и величиной водоёмов (Jaskula, Sojka, 2019). Обработка и классификация космических снимков проводилась с помощью программных продуктов Erdas Imagine, Qgis.

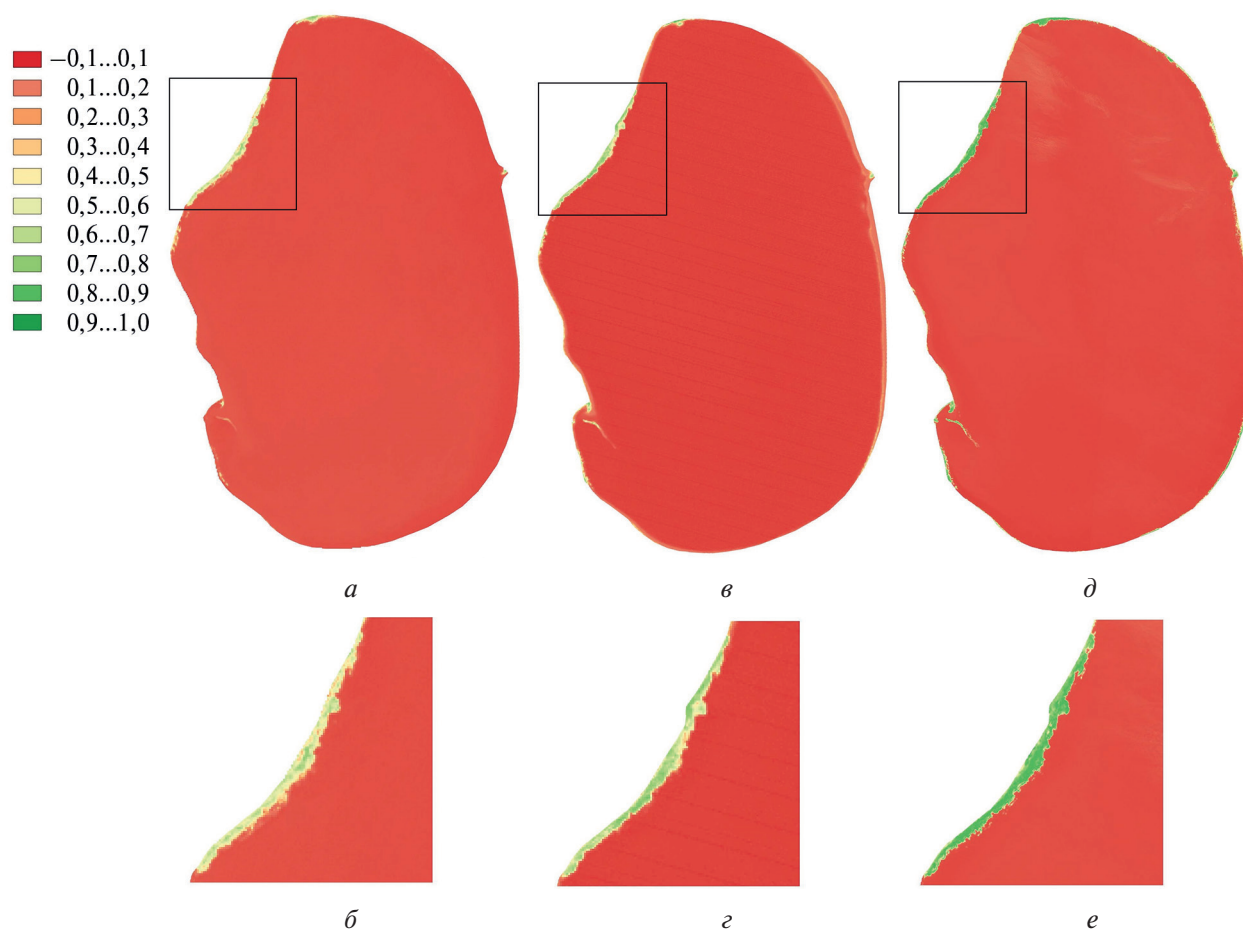


Рис. 1. Результаты расчёта NDVI для оз. Бол. Топольное (верхний ряд) и крупномасштабные фрагменты (северо-западное побережье) (нижний ряд): а, б — Landsat-7, 21 июня 2000 г.; в, г — Landsat-5, 28 августа 2010 г.; д, е — Sentinel-2, 12 августа 2019 г.

Используемые многоспектральные данные

Спутник	Сканер	Пространственное разрешение, м (каналы)	Дата съёмки	Используемые каналы (индекс растительности)	Используемые каналы (классификация)
Sentinel-2	MSI	10 (2, 3, 4, 8)	12.08.2019	2, 4, 8	8, 4, 3
Landsat-5	MSS	30 (3, 4)	18.06.1990	3, 4	3, 2, 1
	TM	30 (1, 2, 3, 4)	28.08.2010	1, 3, 4	3, 2, 1
Landsat-7	ETM+	30 (1, 2, 3, 4)	21.06.2000	1, 3, 4	4, 3, 2

Примечание: MSI — *англ.* Multispectral Instrument; MSS — *англ.* Multispectral Scanner System; TM — *англ.* Thematic Mapper; ETM+ — *англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus.

Для оценки зарастания оз. Бол. Топольное водной и околоводной растительностью применялись методы расчёта вегетационных индексов: NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (*англ.* Soil Adjusted Vegetation Index), MSAVI2 (*англ.* Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2), WAVI (*англ.* Water Adjusted Vegetation Index), методы параметрической и непараметрической классификации изображений.

Нормализованный относительный индекс растительности (NDVI) (*рис. 1*, см. с. 167) определяет количество фотосинтетической активной биомассы (Евдокимов, Михалап, 2015). Индекс изменяется во время всего вегетационного периода. Для обнаружения зарастания водоёмов индекс показывает умеренное совпадение с натурными данными (Jaskula, Sojka, 2019).

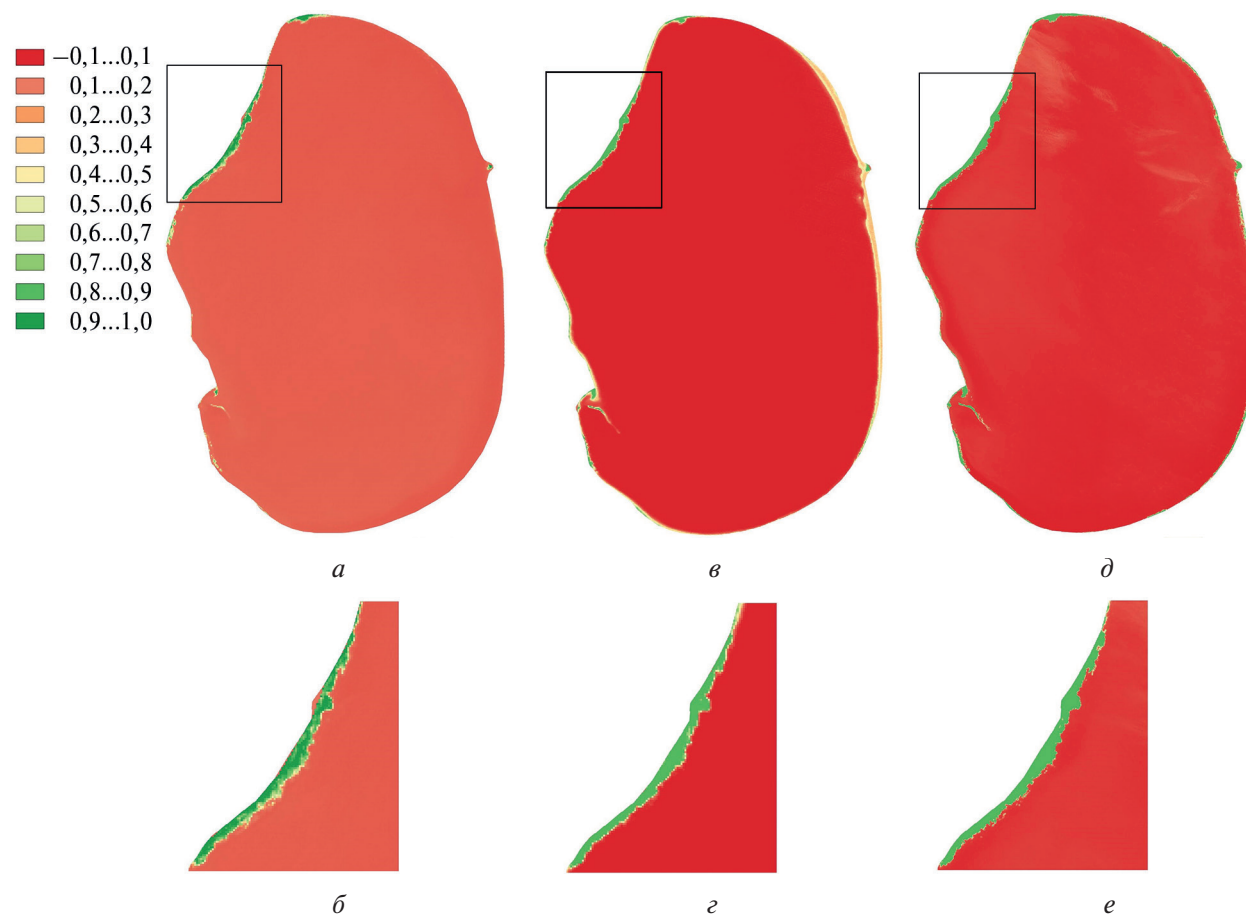


Рис. 2. Результаты расчёта WAVI для оз. Бол. Топольное (*верхний ряд*), крупномасштабные фрагменты (северо-западное побережье) (*нижний ряд*): *а, б* — Landsat-7, 21 июня 2000 г.; *в, г* — Landsat-5, 28 августа 2010 г.; *д, е* — Sentinel-2, 12 августа 2019 г.

Для снижения влияния почвенного фона используется SAVI — почвенный вегетационный индекс, в дальнейшем усовершенствованный до MSAVI2 — модифицированного почвенного вегетационного индекса. Он хорошо выделяет разреженную растительность на фоне «почвенного шума» (Huete, 1988; Qi et al., 1994).

Параметр WAVI — индекс растительности с поправкой на воду (рис. 2, см. с. 168). Используется для диагностики и выявления водной растительности. Выражается в уравнении как отношение разности ближнего инфракрасного диапазона (ρ_{Nir}) и синего (ρ_{Blue}) к их сумме с учётом поправочного коэффициента фонового сигнала, равного 0,5. Идентифицирует водную растительность лучше, чем NDVI и SAVI (Villa et al., 2014; Zhou et al., 2018). Индекс чувствителен к низкой плотности растительного покрова в пикселе и спектральным особенностям водных растений (Villa et al., 2014).

В Erdas Imagine непараметрическая классификация многоспектральных снимков основывается на методе кластерного анализа класса ISODATA (англ. Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique, итеративный самоорганизующийся метод анализа данных) (Шовенгердт, 2010). Кластеризация начинается от средних значений, взятых из существующих сигнатур, и заканчивается после того, как будет достигнуто максимальное количество итераций или максимальная доля в процентах пикселей, не изменивших свой класс (предел сходимости).

Параметрическая классификация базируется на использовании сигнатур (спектральных признаков) элементов объектов, расположение которых известно на местности. Формирование сигнатур проводилось с помощью инструментария AOI (англ. Area of Interest) по участкам фактического зарастания лоха узколистного.

Для проверки результатов классификаций использовался сервис Google Планета Земля Pro (англ. Google Earth Pro). На территорию оз. Бол. Топольное для проверки использовались доступные снимки Google за период с 2000 по 2019 г.

Результаты и их обсуждение

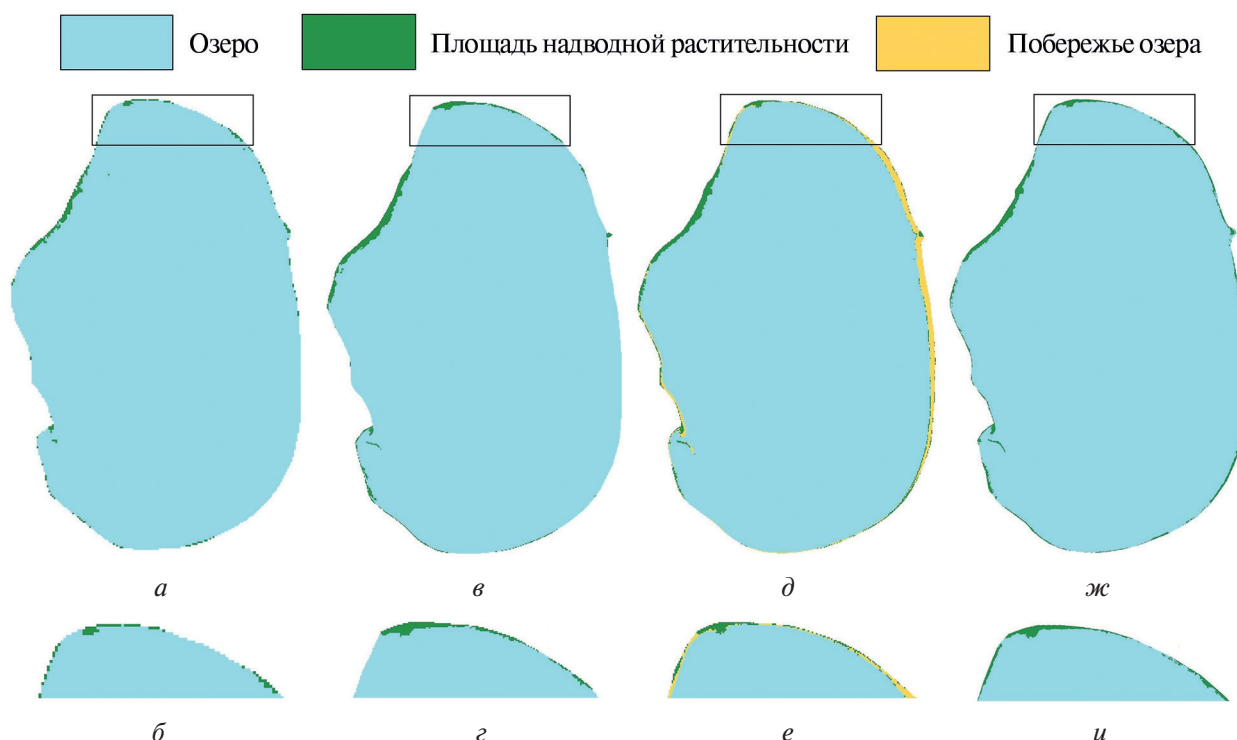


Рис. 3. Карты-схемы зарастания, полученные в результате непараметрической классификации на 20 классов (верхний ряд), крупномасштабные фрагменты (северное побережье) (нижний ряд): а, б — 18 июня 1990 г.; в, г — 21 июня 2000 г.; д, е — 28 августа 2010 г.; ж, и — 12 августа 2019 г.

Анализ полученных результатов по расчётам вегетационных индексов и непараметрической классификации показывает, что незначительное распространение околководной растительности в 1990 г. наблюдается в северо-западной и северной частях озера (рис. 3а, б, см. с. 169). По полученным данным общая площадь растительности составила 1,0 км².

В последующие годы наблюдалось увеличение площади зарастания околководной растительностью. В частности, в 2000 г. (рис. 3в, г) площадь зарастания достигла 1,8 км². Увеличивается площадь зарастания на северном и северо-западном участках (значение индексов увеличивается с 0,0 до 0,5–0,8) и появляются небольшие участки зарастания в юго-западной и северо-восточной частях (значение индексов увеличивается с 0,0 до 0,4–0,8).

С 2007 по 2015 г. площадь водного зеркала оз. Бол. Топольное уменьшалась. На восточном побережье образовалась широкая полоса пляжа. С 2015 по 2019 г. озеро заполнялось. В 2010 г. (рис. 3д, е) становится больше площадь зарастания на северном и северо-западном (значение индексов увеличивается с 0,5–0,8 до 0,7–1,0), юго-западном (значение индексов увеличивается с 0,4–0,8 до 0,7–1,0) участках, площадь распространения растительности составляла 2,0 км².

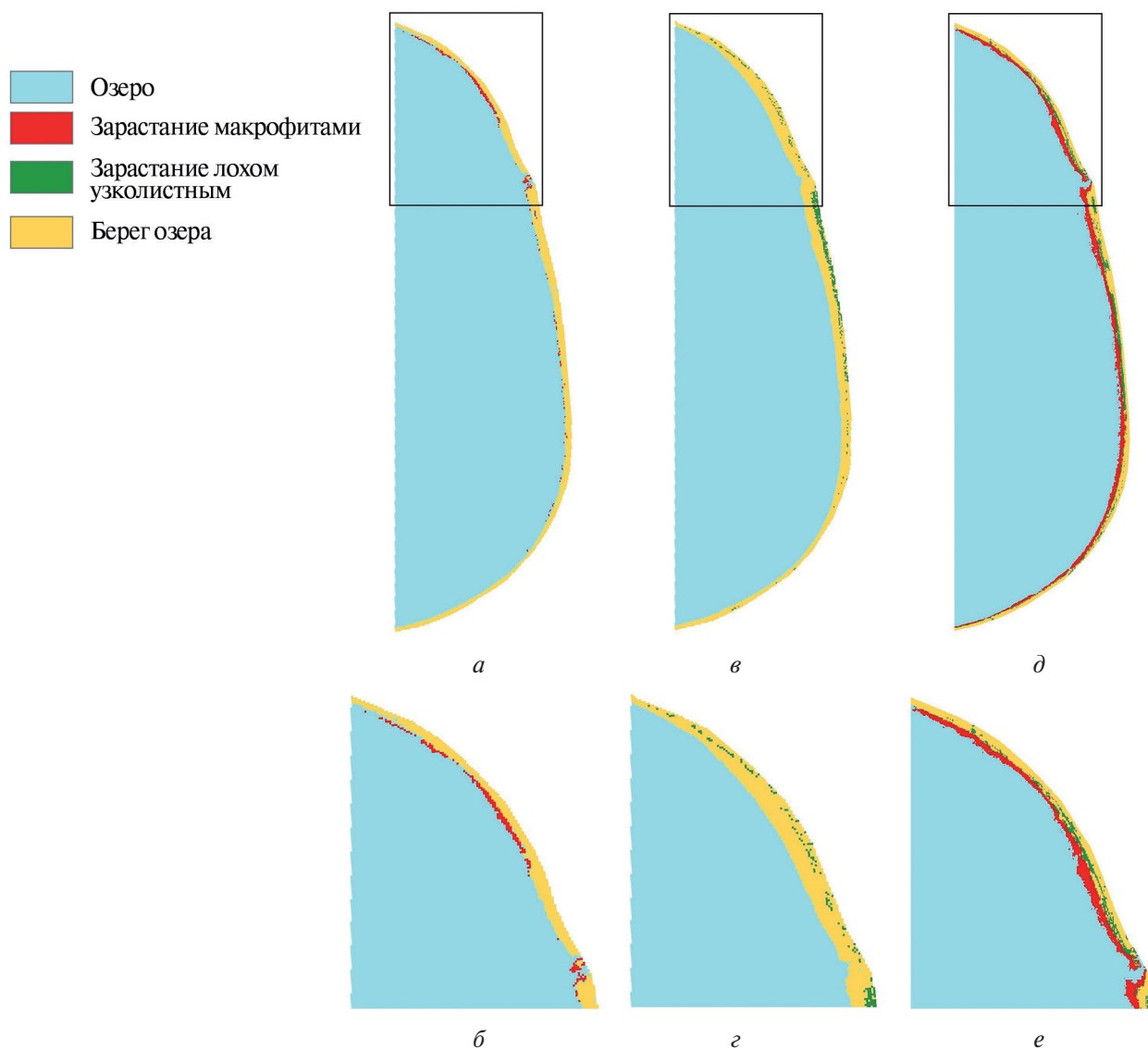


Рис. 4. Карты-схемы зарастания, полученные в результате параметрической классификации (верхний ряд), крупномасштабные фрагменты (северо-восточное побережье) (нижний ряд): а, б — 21 июня 2000 г.; в, г — 28 августа 2010 г.; д, е — 12 августа 2019 г.

В 2019 г. (рис. 3ж, и) растёт площадь распространения околотоводной растительности по всему периметру озера. Кроме крупных участков зарастания в северной, северо-западной и юго-западной частях, небольшие массивы растительности образовались в южной, юго-восточной, восточной, северо-восточной частях. Индексы на крупных участках зарастания увеличиваются до 0,8–1,0, на небольших — до 0,8–1,0. На новообразованных участках значения индексов достигают от 0,4 до 1,0. Площадь зарастания составила 2,3 км², увеличившись в целом за 30-летний период (с 1990 по 2019 г.) на 1,3 км².

На побережье растут площади распространения лоха узколистного. Зарастание отмечается на восточном, юго-восточном и южном побережье озера. Если на космическом снимке 2010 г. отображаются отдельные небольшие заросли лоха, что подтверждается увеличением NDVI и MSAVI2 за период 2000–2010 гг. с 0,0 до 0,4–0,8, то на снимке 2019 г. значение NDVI и MSAVI2 увеличивается до 0,5–0,9. В целом площадь зарастания лохом на восточном побережье озера увеличилась с 0 км² в 2000 г. до 0,6 км² в 2019 г. (рис. 4, см. с. 170).

Интенсивное зарастание акватории оз. Бол. Топольное водной и околотоводной растительностью связано, прежде всего, с таким природным фактором, как изменение его уровня режима, который повлёк за собой проникновение макрофитов вглубь озёрной котловины. Тогда как зарастание побережья лохом узколистым обусловлено антропогенными факторами. Использование лоха в защитных лесонасаждениях привело к его дальнейшему массовому расселению, а уменьшение уровня антропогенной нагрузки на побережье озера, в том числе за счёт сокращения поголовья скота (в Бурлинском р-не — более чем в два раза), снижения уровня эксплуатации оз. Бол. Топольное в туристических и рыболовных целях, создало благоприятные условия для зарастания растений.

Выводы

Непараметрическая классификация многоспектральных снимков Sentinel-2 и Landsat (Landsat-5, -7), как выяснилось, более эффективна для выделения водной и околотоводной растительности, поскольку для распознавания искомым объектов на основе параметрической классификации оказалось сложно представить статистически значимые выборки сигнатур. Поэтому некоторые участки зарастания, которые корректно выделялись вместе с другими искомыми участками на основе непараметрического метода, были ошибочно выделены параметрическим классификатором. Также параметрический классификатор показывал ошибочные результаты для крупных областей озера, не подверженных зарастанию.

Для акватории оз. Бол. Топольное отмечается увеличение применимых вегетационных индексов по всему периметру озера с 0 до 0,7–1,0. За 30-летний период (1990–2019) площадь зарастания акватории водной и околотоводной растительностью увеличилась с 1 до 2,3 км². При дальнейшей тенденции зарастания к 2050 г. озеро будет иметь пояс из околотоводной растительности шириной в среднем около 100 м.

Для восточного побережья оз. Бол. Топольное отмечается увеличение применяемых вегетационных индексов с 0,4–0,7 до 0,5–0,9. За 20-летний период (с 2000 по 2019 г.) площадь зарастания лохом узколистым увеличилась с 0 до 0,6 км². При дальнейшей тенденции зарастания к 2050 г. на побережье озера будет располагаться пояс из лоха узколистного шириной в среднем около 30–40 м.

Проведённые исследования на примере оз. Бол. Топольное подтвердили эффективность использования вегетационных индексов NDVI, MSAVI2, WAVI для определения границ зарастания водоёмов водной и околотоводной растительностью на участках с площадью до 100–900 м², которые распознаются с помощью космических снимков с соответствующим спектральным и пространственным разрешением. Для выделения участков меньших размеров необходимо использовать спектральные космические данные сверхвысокого разрешения.

Наиболее результативным оказался вегетационный индекс NDVI: за исследуемый период отмечается равномерный рост его значений, что показывает увеличение плотности околотоводной растительности в мелких и крупных границах зарастания и соответствует полевым наблюдениям. Значения MSAVI2 и WAVI на новообразовавшихся участках зарастания уже

в начале исследуемого периода показывают значения, близкие к 1,0, что означает высокую плотность растительного покрова на этих участках и противоречит данным натурных наблюдений. В связи с этим использование индекса NDVI для распознавания границ зарастания водных объектов водной и околоводной растительностью, а также выявления динамики этого процесса представляется наиболее предпочтительным.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН, а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 21-55-75002).

Литература

1. Евдокимов С. И., Михалач С. Г. Определение физического смысла комбинации каналов снимков Landsat для мониторинга состояния наземных и водных экосистем // Вестн. Псковского гос. ун-та. Сер.: Естественные и физико-математические науки. 2015. № 7. С. 21–32.
2. Зарубина Е. Ю., Соколова М. И. Гигрофильная флора Бурлинской озерно-речной системы (Обь-Иртышское междуречье) // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2017. № 16. С. 78–82.
3. Зарубина Е. Ю., Соколова М. И. Связь видового разнообразия макрофитов с морфометрией и гидрхимическими характеристиками озер (на примере разнотипных водоемов Бурлинской озерно-речной системы, юг Обь-Иртышского междуречья) // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2018. № 17. С. 66–70.
4. Черная Книга флоры Сибири / науч. ред. Виноградова Ю. К., отв. ред. Куприянов А. Н. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2016. 439 с.
5. Шибанова А. А., Курепина Н. Ю., Плуталова Т. Г., Кирина А. О. Территориальные особенности распространения сообществ чужеродных видов растений в степной зоне Алтайского края (на примере рода *Elaeagnus* L.) // Фундам. исслед. 2013. № 11(1). С. 133–137.
6. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений: пер. с англ. А. В. Кирюшина, А. И. Демьяникова. М.: Техносфера, 2010. 556 с.
7. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. 1988. V. 25. No. 3. P. 295–309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
8. Jaskula J., Sojka M. Assessing Spectral Indices for Detecting Vegetative Overgrowth of Reservoirs // Polish J. Environmental Studies. 2019. V. 28. No. 6. P. 4199–4211. DOI: 10.15244/PJOES/98994.
9. Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Keer Y. H., Sorooshian S. A modified soil adjusted vegetation index // Remote Sensing of Environment. 1994. V. 48. No. 2. P. 119–126. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90134-1.
10. Villa P., Mousivand A., Bresciani M. Aquatic vegetation indices assessment through radiative transfer modeling and linear mixture simulation // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. V. 30. P. 113–127. DOI: 10.1016/j.jag.2014.01.017.
11. Zhou G., Ma Z., Sathyendranath S., Platt T., Jiang C., Sun K. Canopy reflectance modeling of aquatic vegetation for algorithm development: Global sensitivity analysis // Remote Sensing. 2018. V. 10. Iss. 6. Art. No. 837. DOI: 10.3390/RS10060837.

Assessing the dynamics of natural coastal complexes of Lake Bolshoye Topolnoye (Altai Krai) using a time series of multispectral data of different resolution

A. V. Golovin, N. V. Stoyashcheva, N. M. Kovalevskaya

*Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia
E-mail: golovin.anton.vl@gmail.com*

The paper presents the assessment results of the dynamics of natural coastal complexes of Lake Bolshoye Topolnoye by remote sensing methods based on studying multi-temporal space images (Sentinel-2, Landsat-5, Landsat-7) of different resolution. Vegetation indices (NDVI, SAVI, MSAVI2,

WAVI), parametric and non-parametric classifications were calculated in the Erdas Imagine program for the littoral part of Lake Bolshoe Topolnoe for the years 1990, 2000, 2010, and 2019. It has been found that the lake's water area and its coast are prone to overgrowth by coastal and shrubby (narrow-leaved oleaster) vegetation over the course of several years. Such a situation can adversely affect natural systems distinguished by a rich resource potential for the tourism development. In 2000–2019, in small and large areas of the lake covered with coastal vegetation these indices increased from 0.4–0.6 to 0.7–0.8 and 0.7–0.8 to 0.8–1.0, respectively. According to the non-parametric classification by 20 classes, the overgrowth area increased from 1 to 2.3 km². Shrub vegetation was common on the eastern, southeastern, and southern coasts of the lake. Here, the index values increased from 0.4–0.6 to 0.7–0.8 (2010–2019). The parametric classification showed the increase of the overgrowth area within 0 (2000)–0.6 km² (2019). Intensive overgrowth of the lake with coastal vegetation is associated with fluctuations in water level regime, shrub vegetation (i.e. narrow-leaved oleaster use in the field-protective forest belts of the steppe parts of the Region), decline in the lake exploitation for fishing purposes and livestock reduction in the Burlinsky region.

Keywords: Lake Bolshoe Topolnoe, Earth remote sensing, Sentinel-2, Landsat-5, Landsat-7, vegetation indices

Accepted: 16.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-166-173

References

1. Evdokimov S. I., Mikhalap S. G., Determination of physical meaning of band combinations of Landsat images for monitoring terrestrial and aquatic ecosystems, *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki*, 2015, No. 7, pp. 21–32 (in Russian).
2. Zarubina E. Yu., Sokolova M. I., Hygrophilous flora of Burlinsky lake and river system (Ob-Irtysh Interfluve), *Problemy botaniki Yuzhnoi Sibiri i Mongolii*, 2017, No. 16, pp. 78–82 (in Russian).
3. Zarubina E. Yu., Sokolova M. I., Communication of a specific variety of macrophyte with a morphometry and hydrochemical characteristics of lakes (on example of polytypic river lakes of Burlinsky system, the South of the Ob-Irtysh interfluve), *Problemy botaniki Yuzhnoi Sibiri i Mongolii*, 2018, No. 17, pp. 66–70 (in Russian).
4. *Chernaya Kniga flory Sibiri* (Black Book of the flora of Siberia), Vinogradova Yu. K., Kupriyanov A. N. (eds.), Novosibirsk: Geo, 2016, 439 p. (in Russian).
5. Shibanova A. A., Kurepina N. Yu., Plutalova T. G., Kirina A. O., Territorial features of distribution of communities of alien plant species in the steppe zone of Altai Krai (by the example of the genus *Elaeagnus* L.), *Fundamental'nye issledovaniya*, 2013, No. 11(1), pp. 133–137 (in Russian).
6. Schowengerdt R. A., *Remote sensing. Models and methods of image processing*, Elsevier, 2006, 560 p.
7. Huete A. R., A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, 1988, Vol. 25, No. 3, pp. 295–309, DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
8. Jaskula J., Sojka M., Assessing Spectral Indices for Detecting Vegetative Overgrowth of Reservoirs, *Polish J. Environmental Studies*, 2019, Vol. 28, No. 6, pp. 4199–4211, DOI: 10.15244/PJOES/98994.
9. Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Keer Y. H., Sorooshian S., A modified soil adjusted vegetation index, *Remote Sensing of Environment*, 1994, Vol. 48, No. 2, pp. 119–126, DOI: 10.1016/0034-4257(94)90134-1.
10. Villa P., Mousivand A., Bresciani M., Aquatic vegetation indices assessment through radiative transfer modeling and linear mixture simulation, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, Vol. 30, pp. 113–127, DOI: 10.1016/j.jag.2014.01.017.
11. Zhou G., Ma Z., Sathyendranath S., Platt T., Jiang C., Sun K., Canopy reflectance modeling of aquatic vegetation for algorithm development: Global sensitivity analysis, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, Issue 6, Art. No. 837, DOI: 10.3390/RS10060837.