

Гидрология
Болданова Е.В.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 528.88

doi: 10.17072/2079-7877-2022-2-73-89

ОЦЕНКА ТРОФНОСТИ ОЗЕРА БАЙКАЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Елена Владимировна Болданова

Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Россия

boldanova@mail.ru, Author ID: 277511

Аннотация. Существующие модели оценки показателей трофности водоемов рассчитаны для конкретных водоемов, в связи с чем при применении их на других водных объектах требуется адаптация. Другой проблемой является отсутствие подходов в дистанционном мониторинге к разработке интегрального показателя трофности водоемов. Цель данного исследования – разработка моделей для расчета биотических и абиотических показателей оценки состояния водоема, а также интегрального показателя трофности водоема. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи: сравнить возможности использования спутниковых снимков для оценки водоемов, провести расчет показателей трофности оз. Байкал по существующим моделям, при необходимости адаптировав их, разработать модели расчета биотических и абиотических показателей, дать интегральную оценку трофности оз. Байкал и описать алгоритм его получения. Объектом исследования выступает оз. Байкал. Предметом исследования является оценка трофности водоема. Теоретико-методическую основу работы составили исследования отечественных и зарубежных авторов в области оценки трофности водоемов, геоинформационных систем (ГИС), а также данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Использовались методы пространственного и корреляционно-регрессионного анализов. Эмпирическая и информационно-статистическая база работы включает в себя статистические и аналитические публикации в прессе по исследуемой теме, статистические данные Российской Федерации, данные зарубежной статистики, данные семинаров и конференций по проблемам оценки трофности водоемов, использованию ГИС и ДЗЗ в оценке состояния водных объектов. Научно-практическая новизна и значимость полученных результатов заключаются в разработке алгоритма оценки трофности водоема с помощью ГИС и ДЗЗ. Оценены параметры моделей расчета прозрачности по диску Секки и концентрации хлорофилла-а. Предложено для экспресс-оценки трофности водоемов использовать ранговую оценку, разработана соответствующая шкала для определения типа трофности водоема. Описан алгоритм оценки трофности водоема.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, озеро Байкал, Sentinel-2, прозрачность воды, концентрация хлорофилла-а

Для цитирования: Болданова Е.В. Оценка трофности озера Байкал с использованием дистанционного зондирования // Географический вестник = Geographical bulletin. 2022. № 2(61). С. 73–89. doi: 10.17072/2079-7877-2022-2-73-89.



HYDROLOGY

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2022-2-73-89

**EVALUATION OF THE TROPHIC STATUS OF LAKE BAIKAL USING
REMOTE SENSING****Elena V. Boldanova**Baikal State University, Irkutsk, Russia
boldanova@mail.ru, AuthorID: 277511

Abstract. The existing models for assessing the trophicity indicators of water bodies are intended for specific water bodies, and adaptation is required for their use with regard to others. Another problem is the lack of approaches in remote monitoring to the development of an integral indicator of the trophicity of water bodies. The purpose of this study is to develop models for calculating biotic and abiotic indicators for assessing the state of a reservoir, as well as an integral indicator of its trophicity. To achieve this goal, the tasks were set to compare the possibilities of using satellite images to assess water bodies, to calculate the trophic indicators of Lake Baikal according to existing models, adapting them, if necessary, to develop models for calculating biotic and abiotic indicators, to develop an integral assessment of the trophicity of Lake Baikal, and describe the algorithm for obtaining it. The object of the study is Lake Baikal. The subject of the study is the assessment of the reservoir's trophicity. In terms of theoretical and methodological basis, the study relies on research works of Russian and foreign authors in the field of assessing the trophicity of water bodies, geographic information systems (GIS) as well as Earth remote sensing data (ERS). The methods of spatial analysis and correlation-regression analysis were used. The empirical and information-statistical bases of the work include statistical and analytical publications in the press on the topic under study, statistical data of the Russian Federation, foreign statistics, data from seminars and conferences on the problems of assessing the trophicity of water bodies, and the use of GIS and remote sensing data in assessing the state of water bodies. The scientific and practical novelty and significance of the results obtained lie in the development of an algorithm for assessing the trophicity of the reservoir using GIS and remote sensing. The parameters of models for calculating the Secchi disk transparency and chlorophyll-a concentration have been estimated. It is proposed to use rank assessment for express evaluation of the trophicity of water bodies, and an appropriate scale has been developed to determine the type of trophicity of the reservoir. An algorithm for estimating the trophicity of the reservoir is described.

Keywords: remote sensing, Lake Baikal, Sentinel-2, water transparency, chlorophyll-a concentration

For citation: Boldanova, E.V. (2022). Evaluation of the trophicity of Lake Baikal using remote sensing. *Geographical Bulletin*. No. 2(61). Pp. 73–89. doi: 10.17072/2079-7877-2022-2-73-89.

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью использования геоинформационных систем для экспресс-оценки границ и трофности водоемов. Современные возможности обработки космоснимков предоставляют возможность такой обработки.

Существующие подходы к оценке трофности водоемов позволяют проводить в полевых условиях расчет не только биотических и абиотических показателей, но и интегрального показателя трофности. Но измерения *in situ* требуют привлечения высококвалифицированных специалистов, участие которых достаточно дорогостоящее и не отличается всеохватностью и оперативностью. Поэтому возникла насущная необходимость использования данных дистанционного зондирования на основе спутниковых снимков.

На сегодняшний день разработаны различные модели для расчета прозрачности воды, концентраций хлорофилла-а, растворенного кислорода, взвеси и т.д. для определенных водоемов. Однако требуется их адаптация для исследования оз. Байкал.

Гидрология
Болданова Е.В.

Вопросами оценки трофности водоемов в свое время занимались такие ученые, как А. Тинеманн [40] и Е. Науманн [32], С.П. Китаев [9], Г.Г. Винберг [3], Н.Ж. Elster [26], W. Rohde [36], W. Ohle [34], А.Ф. Алимов [1], М.С. Голубков [4], Г. Одум [12], Ю. Одум [13], Л.Л. Россолимо [14], J.H. Steel [39], R.A. Vollenweider [41], S.J. Gray [29], S.W. Nixon [33], M. Karydis [31] и др. Разработку интегрального индекса трофического состояния водоема проводили следующие ученые: R.E. Carlson [24], D.B. Porcella [35], Ю.С. Даценко [5], В.В. Бульон [2], R.A. Vollenweider [42], N.M. Burns [22].

Данные дистанционного мониторинга для оценки состояния водоемов на основе спутниковых систем применяли: Y. Sakuno [37], J. Delegido [25], M. Bonansea [20], K. Ismail [300], A. Gilerson [27], A. Gitelson [28], С. Cairo [23], Т.И. Кутявина [11], X. Sòria-Perpinyà [38], А.А. Донцов [6–8], С.А. Рылов [17], О.А. Тихомиров [19], а также многие другие исследователи. Проблемы оз. Байкал изучали многие авторы, например, Г.Д. Русецкая [15, 16], А.П. Суходолов и А.П. Федотов [18].

Существующие модели оценки показателей трофности водоемов рассчитаны для конкретных водоемов, и поэтому для их применения на других водных объектах требуется адаптация. Другой проблемой является отсутствие подходов в дистанционном мониторинге к разработке интегрального показателя трофности водоемов.

Материалы и методы исследования

Целью данного исследования является разработка моделей для расчета биотических и абиотических показателей оценки состояния водоема, а также интегрального показателя трофности водоема.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- сравнить возможности использования спутниковых снимков для оценки водоемов;
- провести расчет показателей трофности оз. Байкал по существующим моделям, при необходимости адаптировав их;
- разработать модели расчета биотических и абиотических показателей;
- разработать интегральную оценку трофности оз. Байкал и описать алгоритм его получения.

Объектом исследования является оз. Байкал, которое относится к олиготрофному типу, исключения составляют соровые мелководья, устья впадающих рек.

Предмет исследования – оценка трофности водоема. Состояние озера может изменяться под влиянием различных причин, включая изменение водности, климатические изменения, антропогенную нагрузку. Для оценки динамики изменений по данным ДЗЗ необходимы модели, откалиброванные по данным *in situ*.

Теоретико-методическую основу составили исследования отечественных и зарубежных авторов в области оценки трофности водоемов, геоинформационных систем (ГИС), а также данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Использовались методы пространственного и корреляционно-регрессионного анализов.

Эмпирическая и информационно-статистическая база работы включает в себя статистические и аналитические публикации в прессе по исследуемой теме, статистические данные Российской Федерации, данные зарубежной статистики, данные семинаров и конференций по проблемам оценки трофности водоемов, использования ГИС и ДЗЗ при оценке состояния водных объектов.

Научно-практическая новизна и значимость полученных результатов заключаются в разработке алгоритма оценки трофности водоема с помощью ГИС и ДЗЗ.

В ходе проведения исследования оценены параметры моделей расчета прозрачности по диску Секки и концентрации хлорофилла-а. Предложено для экспресс-оценки трофности водоемов использовать ранговую оценку, разработана соответствующая шкала для определения типа трофности водоема. Описан алгоритм оценки трофности водоема.

Гидрология
Болданова Е.В.

Анализ существующих показателей трофности водоемов показал, что не дана надежная оценка степени трофности, расчеты носят несистематический характер, не имеют общего территориального охвата, анализ динамики затруднителен; наблюдается высокая трудоемкость, требование высокой квалификации специалистов; сложность автоматизации.

Для получения оперативной информации об эвтрофикации водоемов на современном уровне могут использоваться данные дистанционного зондирования Земли, в частности, данные спектральной съемки Landsat, Sentinel-2, которые находятся в открытом доступе. Обработка данных может проводиться с помощью программного обеспечения QGIS.

На основе данных спектральных каналов появляется возможность расчета различных показателей трофности водоемов по различным моделям, предлагаемым разными исследователями. В работе дан сравнительный анализ существующих индексов, используемых спектральных каналов и форм зависимостей.

Для анализа состояния поверхностных вод оз. Байкал с помощью ДЗЗ проведено сравнение космоснимков, полученных разными спутниковыми системами, такими как Ресурс-П, MODIS, Landsat-8, Sentinel-2. Был сделан выбор в пользу миссии Sentinel-2, как представляющей разумный компромисс между оперативностью и точностью данных. В результате проведения атмосферной коррекции и радиометрического расчета коэффициентов спектральной яркости доступно 10 каналов, съемки одной территории ведутся с периодичностью в пять дней. Открытость и доступность данных, возможность их обработки в QGIS, хорошее пространственное разрешение обуславливают обоснованным выбор именно этого источника данных для дальнейшего анализа.

Для сопоставления полевых данных со спутниковыми были подобраны космоснимки Sentinel-2 за май – июнь 2016 г., август – октябрь 2020 г., май 2021 г., сделанные мультиспектральным сканером MSI. В анализе использовались данные спектральных каналов 2–8, 8A, 11, 12. Данные были предварительно обработаны, проведены атмосферная коррекция и радиометрический пересчет в значения коэффициентов спектральной яркости. Для каждой точки взятия полевой пробы подбирался соответствующий по дате снимок, безоблачный в месте проведения измерений, всего было обработано порядка 80 снимков Sentinel-2.

На основе майского космоснимка Sentinel-2 2020 г. были определены границы водоема. Подтверждено, что использование индекса NDWI лучше подходит, чем NDVI, также достаточно часто используемого для этих целей. Далее были проведены расчеты концентрации хлорофилла-а по моделям разных авторов, растворенного кислорода, прозрачности по диску Секки, концентрации фосфатов, нитратов, фикоцианина. Сделан вывод, что рассмотренные модели расчета показателей трофности водоемов не позволяют с достаточной степенью точности проводить расчет по оз. Байкал. Требуется адаптация моделей по полевым данным.

Для адаптации модели расчета прозрачности были использованы данные об измерении прозрачности по диску Секки во время весенних и осенних экспедиций ФГБУН Лимнологического института СО РАН в 2020 г. Места расположений станций для определения прозрачности по диску Секки (SD, м) указаны на рис. 1.

Для моделирования оценки концентрации хлорофилла-а использовались данные экспедиций Лимнологического института в мае – июне 2016г., а также данные за осень – весну 2020/2021г., полученные от датчика качества воды AAQ177 Rinko water quality profiler, JFE Advantech, Japan, расположенного в районе Больших Котов (рис. 1). Экспедиционные пробы использовались с поверхности, датчик анализирует воду, поступающую с глубины 4 м.

Отбор проб пелагического планктона оз. Байкал описан у Н.А. Бондаренко и др. (2019) [21], где сказано, что в конце весны 2016 г. пробы были взяты с борта научно-

Гидрология
Болданова Е.В.

исследовательского судна «Г.Ю. Верещагин» с помощью карусельного пробоотборника воды SBE-32 (Sea-Bird Electronics, США) на 21-й станции по всему озеру (рис. 1). Пробы химического состава воды и планктона были взяты на 0, 2, 5, 10, 15, 20, 25 и 50 м, в расчетах данного исследования были задействованы данные в поверхностном слое. Для определения концентрации хлорофилла-а 1 л воды фильтровали через поликарбонатный фильтр 0,4 мкм. Пигменты водорослей экстрагировали ацетоном (90%) в течение ночи в темноте при температуре 4°C (после ультразвуковой обработки). Супернатант центрифугировали и измеряли хлорофилл-а спектрофотометром Cintra-2020 при 664, 647 и 630 нм и рассчитывали на основе уравнений, приведенных Parsons et al. (1984) [21].

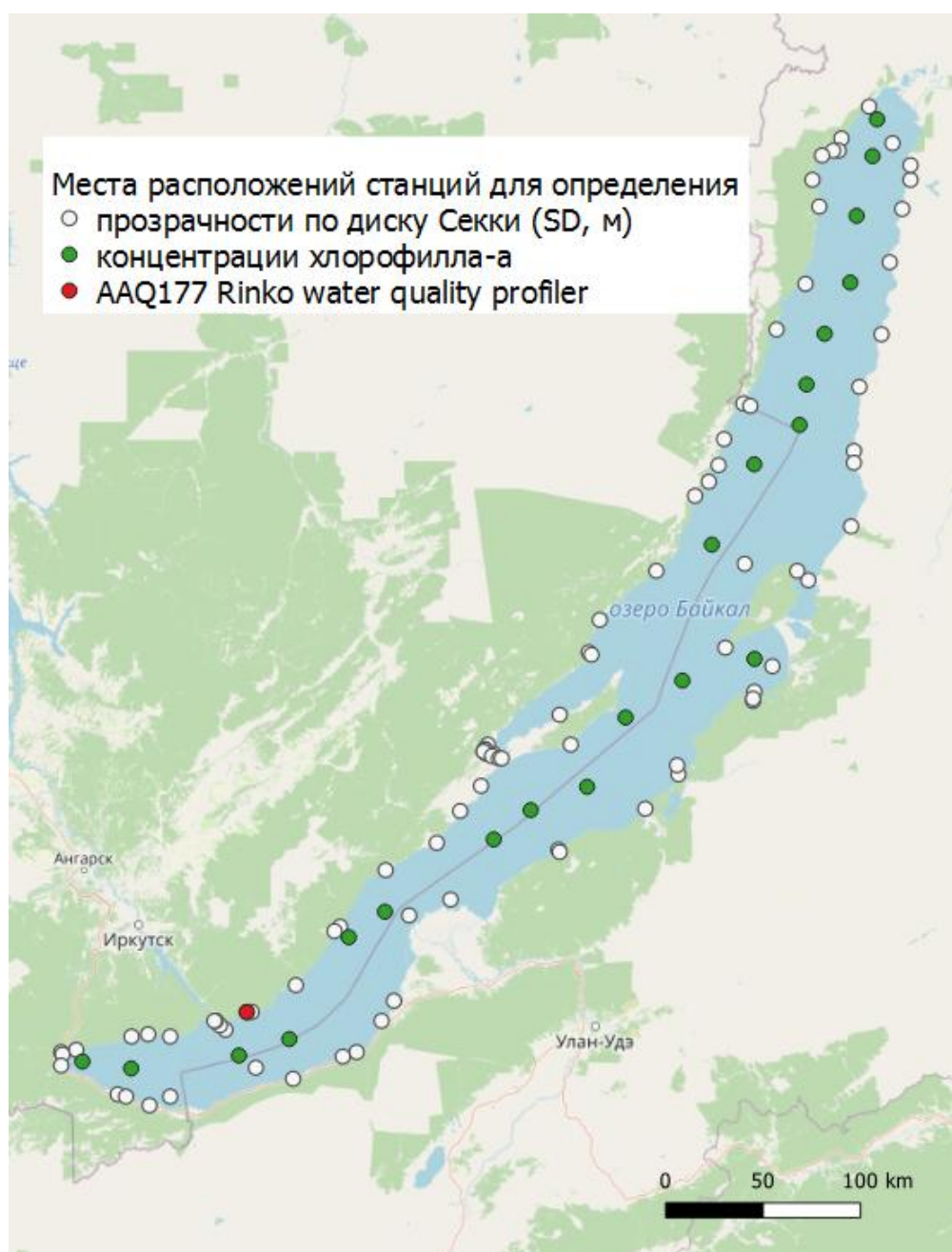


Рис. 1. Места расположений станций для определения прозрачности по диску Секки (SD, м) и концентрации хлорофилла-а

Fig. 1 Locations of stations for determining the Secchi disk transparency (SD, m) and the concentration of chlorophyll-a

Гидрология
Болданова Е.В.

На первом этапе были использованы данные майской экспедиции 2018 г. На основе сопоставления с подобранными снимками Sentinel-2 для расчета модели были получены исходные данные спектральных каналов.

Результаты и их обсуждение

При анализе существующих моделей расчета прозрачности водоемов по диску Секки было выяснено, что исследователями использовались линейные и степенные зависимости. Поэтому по полученным исходным данным были проверены подобные корреляционные зависимости между влияющими факторами и исследуемым показателем.

За основу расчетов были взяты следующие модели расчета прозрачности водоемов по диску Секки (табл. 1) с использованием данных Sentinel-2.

Таблица 1

Общий вид моделей расчета прозрачности водоемов по диску Секки
с использованием спектральных каналов Sentinel-2

General view of the models for calculating the Secchi disk transparency using the Sentinel-2 spectral channels

Автор	Модель	Источник
J. Delegido et al.	$SD = 4,7134 * (R490/R560)^{2,5569}$	[25]
Bonanse, M. et al.	$SDT = 1,79 - 134,15 * Band_{RE1} + 157,72 * Band_{NIR} + 0,53 * \left(\frac{Band_{RE3}}{Band_{NIRn}} \right)$	[20]

В результате верификации перечисленных моделей по данным весенней экспедиции 2018 г. были получены менее значимые результаты, чем у авторов моделей. Поэтому был сделан дополнительный расчет по данным весенней и осенней экспедиций 2018 г. с исключением нетипичных данных. Результаты не улучшились (табл. 2).

Таблица 2

Верификация моделей для расчета прозрачности по диску Секки
Verification of the models for calculating the Secchi disk transparency

Автор	Модель	Качество модели
J. Delegido et al.	По данным весенней экспедиции: $SD = 5,1618 (B02/B03)^{1,7249}$	$R^2 = 0,29$ $F = 13,21 > 7,47$ $t_1 = 3,64 > 2,73$ $t_0 = 10,95 > 2,73$ $E = 43\%$
	По данным весенней и осенней экспедиций: $SD = 6,7327 (B02/B03)^{0,6875}$	$R^2 = 0,10$ $F = 6,99 > 3,99$ $t_1 = 2,64 > 2,00$ $t_0 = 21,00 > 2,00$ $E = 42\%$
Bonanse, M. et al.	По данным весенней экспедиции: $SDT = 11,94 - 2054,00 * B05 + 1834,25 * B08 - 0,27 * \left(\frac{B07}{B8A} \right)$	$R^2 = 0,41$ $F = 7,14 < 7,47$ $t_1 = 4,19 > 2,73$ $t_2 = 3,98 > 2,73$ $t_3 = 0,03 < 2,73$ $t_0 = 1,61 < 2,73$ $E = 49\%$
	По данным весенней и осенней экспедиций: $SDT = 13,87 - 835,39 * B05 + 455,87 * B08 + 1,13 * \left(\frac{B07}{B8A} \right)$	$R^2 = 0,40$ $F = 13,97 < 3,99$ $t_1 = 4,40 > 2,00$ $t_2 = 2,54 > 2,00$ $t_3 = 0,35 < 2,00$ $t_0 = 3,97 > 2,00$ $E = 33\%$

Гидрология
Болданова Е.В.

Сложности с использованием уже имеющихся моделей обуславливают необходимость разработки собственной модели расчета прозрачности поверхностных вод.

Аналогичная проверка существующих моделей была проведена для расчета концентрации хлорофилла-а. За основу были взяты следующие модели (табл. 3).

Таблица 3

Общий вид моделей расчета концентрации хлорофилла-а с использованием спектральных каналов Sentinel-2
General view of the models for calculating the chlorophyll-a concentration using the Sentinel-2 spectral channels

Автор	Модель	Источник
Тихомиров О.И. и др.	$\text{Chl - a} = a_1 * (\text{B02} - \text{B04})/\text{B03} + a_0$	[19]
Ismail K. et al.	$\text{Chl - a} = a_1 * \text{B03} + a_2 * \text{B04} + a_3 * \text{B05} + a_4 * \text{B06} + a_0$	[30]
Sakuno Y. Et al.	$\text{Chl - a} = a_1 * (1/\text{B04}) + a_2 * (\text{B06}/\text{B05}) + a_0$	[37]
Sakuno Y. Et al.	$\text{Chl - a} = a_1 * (1/\text{B04} - 1/\text{B05}) / (1/\text{B07} - \text{B06}) + a_0$	[37]
Gilerson A. et al.	$\text{Chl - a} = a_1 * (\text{B05}/\text{B04}) + a_0$	[27]
Gitelson A. Et al.	$\text{Chl - a} = a_1 * ((1/\text{B04} - 1/\text{B05}) * \text{B06}) + a_0$	[28]

Результаты расчетов коэффициентов моделей и оценка их качества представлены в табл. 4. Проверка качества модели оценивается по коэффициенту детерминации R^2 , надежность модели – по критерию Фишера F (приводится сравнение с табличным значением для доверительной вероятности 95%), надежность коэффициентов модели – по критерию Стьюдента t (приводится сравнение с табличным критерием при той же доверительной вероятности) по средней относительной ошибке аппроксимации E.

Таблица 4

Верификация моделей для расчета концентрации хлорофилла-а для оз. Байкал, мкг/л
Verification of the models for calculating the chlorophyll-a concentration for Lake Baikal, µg/l

Автор	Модель	Качество модели
1	2	3
Тихомиров О.И. и др.	$\text{Chl - a} = -6,16 * (\text{B02} - \text{B04})/\text{B03} + 5,44$	$R^2 = 0,21$ $F = 7,06 > 4,22$ $t_1 = 2,66 > 2,06$ $t_0 = 4,92 > 2,06$ $E = 132\%$
Ismail K. et al.	$\text{Chl - a} = 102,14 * \text{B03} - 194,55 * \text{B04} + 253,00 * \text{B05} - 38,13 * \text{B06} - 0,89$	$R^2 = 0,65$ $F = 10,5 > 2,80$ $t_1 = 1,02 < 2,07$ $t_2 = 0,59 < 2,07$ $t_3 = 0,53 < 2,07$ $t_4 = 0,17 < 2,07$ $t_0 = 0,70 < 2,07$ $E = 100\%$

Гидрология
Болданова Е.В.

Окончание табл. 4

1	2	3
Sakuno Y. Et al.	$\text{Chl - a} = -0,02 * (1/B04) + 1,25 * (B06/B05) + 3,010$	$R^2 = 0,12$ $F = 1,77 < 3,39$ $t_1 = 1,65 < 2,06$ $t_2 = 0,76 < 2,06$ $t_0 = 1,82 < 2,06$ $E = 134\%$
Sakuno Y. Et al.	$\text{Chl - a} = 1,49 * (1/B04 - 1/B05) / (1/B07 - B06) + 3,54$	$R^2 = 0,07$ $F = 1,91 < 4,22$ $t_1 = 1,80 < 2,06$ $t_0 = 4,50 > 2,06$ $E = 129\%$
Gilerson A. et al.	$\text{Chl - a} = 4,45 * (B05/B04) - 0,75$	$R^2 = 0,10$ $F = 2,86 < 4,22$ $t_1 = 1,69 < 2,06$ $t_0 = 0,30 < 2,06$ $E = 135\%$
Gitelson A. Et al.	$\text{Chl - a} = 1,36 * ((1/B04 - 1/B05) * B06) + 3,52$	$R^2 = 0,06$ $F = 1,78 < 4,22$ $t_1 = 1,34 < 2,06$ $t_0 = 4,48 > 2,06$ $E = 128\%$

Как видно из результатов, ни одна из моделей не подходит для расчета концентрации хлорофилла-а для оз. Байкал. Линейные модели не используются вследствие мультиколлинеарности спектральных каналов, их сильной взаимозависимости, поэтому необходим выбор нелинейных моделей.

В результате проведенного анализа, адаптации существующих моделей расчета прозрачности воды по диску Секки, концентрации хлорофилла-а сделан вывод о недостаточной точности этих моделей и необходимости разработки собственных моделей.

Анализ корреляционных зависимостей показал, что для описания этих зависимостей лучше подойдет экспоненциальная функция с использованием значений спектральных каналов B05 и B07 (Band 5, 7 – Vegetation red edge). В результате регрессионного анализа была получена следующая модель:

$$SD = 22,8 * e^{(-142,6 * B05 + 75,0 * B07)} \quad (1)$$

где SD – Secchi Disk, прозрачность по диску Секки, м;

B05, B07 – значения спектральных каналов Sentinel-2.

Коэффициент детерминации $R^2=0,55$. Критерий Фишера свидетельствует о надежности модели ($38,98 > 3,99$), коэффициенты модели статистически значимы по критерию Стьюдента с доверительной вероятностью 95% ($23,00 > 2,00$; $5,05 > 2,00$; $2,89 > 2,00$). Средняя относительная ошибка аппроксимации составила 29%.

Проверка модели была проведена на снимке Sentinel-2 от 25.05.2020 (рис. 2).

Гидрология
Болданова Е.В.

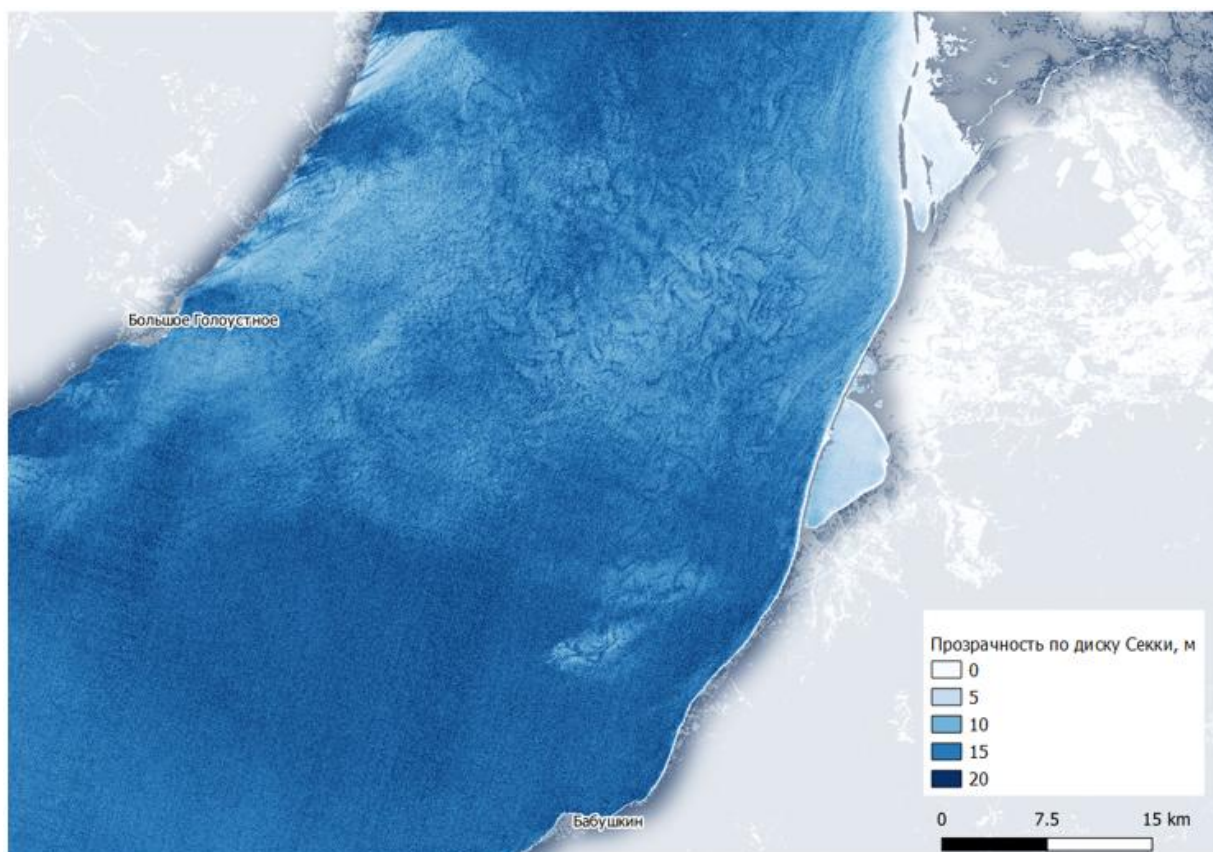


Рис. 2. Карта прозрачности с использованием снимка 2020 г.

Fig. 2. Transparency map based on a 2020 satellite image

Недостатки следующие: есть вероятность большой погрешности в прибрежной зоне, на что влияет, по мнению специалистов, сильное отражение от дна.

Но, в целом, на основе полученной модели появляется возможность строить карты прозрачности по диску Секки на оз. Байкал в период отсутствия экспедиций, анализировать динамику изменения этой прозрачности.

Для оценки концентрации хлорофилла-а на основе корреляционного анализа была предложена полиномиальная модель 2-й степени на основе использования канала V03 (Green), как в наибольшей степени подходящая и в физическом плане, и в смысле математической аппроксимации:

$$Chl-a = 3635,4 * V03^2 - 185,7 * V03 + 3,5, \quad (2)$$

где Chl-a – концентрация хлорофилла-а, мкг/л,

V03 – значение спектрального канала Sentinel-2.

Полученная модель значима по критерию Фишера ($F = 34,08 > 3,39$), коэффициенты модели надежны с доверительной вероятностью 90% ($t_1 = 1,83 > 1,71$; $t_2 = 3,24 > 1,71$; $t_0 = 1,98 > 1,71$). Погрешность составила 51%.

Расчет концентрации хлорофилла-а на снимке Sentinel-2 за 25 мая 2020 г. представлен на рис. 3.

Гидрология
Болданова Е.В.

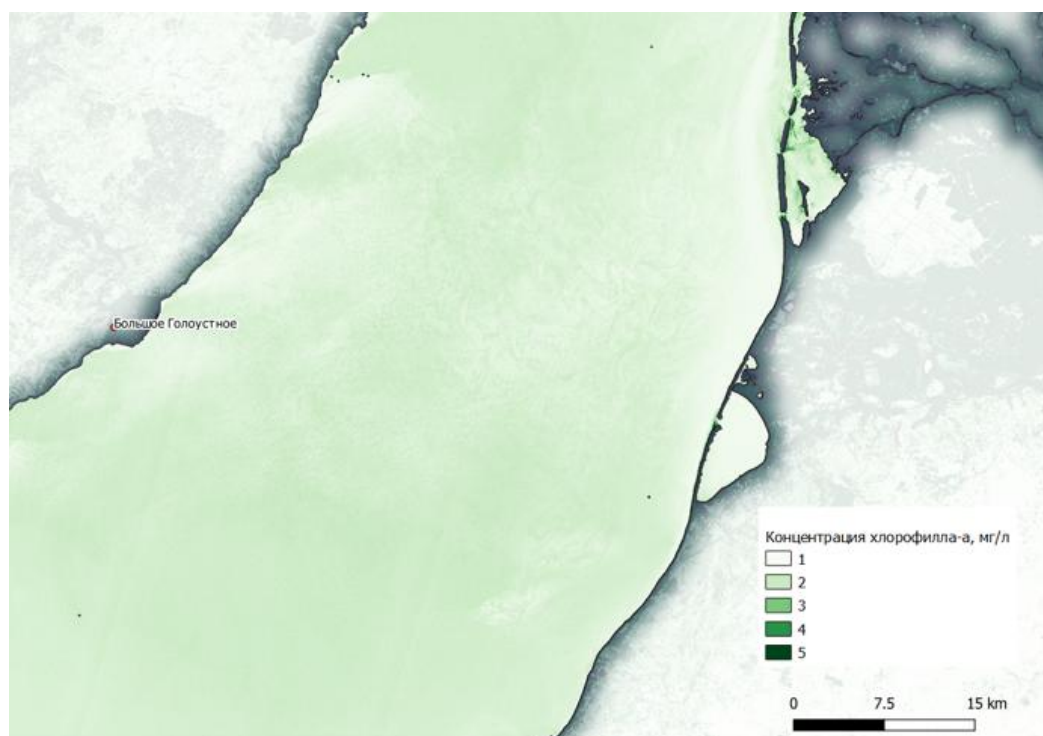


Рис. 3. Расчет концентрации хлорофилла-а на снимке Sentinel-2 за 25.05.2020

Fig. 3. Calculation of the chlorophyll-a concentration in the Sentinel-2 image as of 25 May 2020

Далее сделан вывод о невозможности использования существующих моделей определения концентрации фосфатов и нитратов ввиду отсутствия существенной зависимости значений этих показателей от значений спектральных каналов, а также невозможности предлагаемых другими исследователями линейных моделей вследствие мультиколлинеарности значений спектральных каналов.

Для интегральной оценки трофности водоемов в качестве абиотического показателя в данном исследовании использован показатель прозрачности поверхностных вод по диску Секки, в качестве биотического — показатель концентрации хлорофилла-а. Средние значения параметров шкал для определения трофности водоемов взяты на основе пограничных значений, предложенных общепризнанными авторами.

Для экспресс-оценки трофности водоемов можно использовать ранговую оценку водоемов с присвоением соответствующего места по шкале в зависимости от значения выбранных показателей, соответствующих:

- 1) олиготрофному типу – 1-е место;
- 2) мезотрофному типу – 2-е место;
- 3) эвтрофному типу – 3-е место.

Далее предлагается суммировать места и определять трофность водоема согласно ранговой шкале:

- 2 места – олиготрофный тип;
- 3 места – переходный от олиготрофного к мезотрофному типу;
- 4 места – мезотрофный тип;
- 5 мест – переходный от мезотрофного к эвтрофному типу;
- 6 мест – эвтрофный тип.

Анализ значений концентрации хлорофилла-а для Байкала свидетельствует, что озеро относится к олиготрофному типу. Поэтому проверку сосредоточим на сравнении с пограничным значением концентрации хлорофилла-а 3 мкг/л. Результат расчета представлен на рис. 4.

Гидрология
Болданова Е.В.

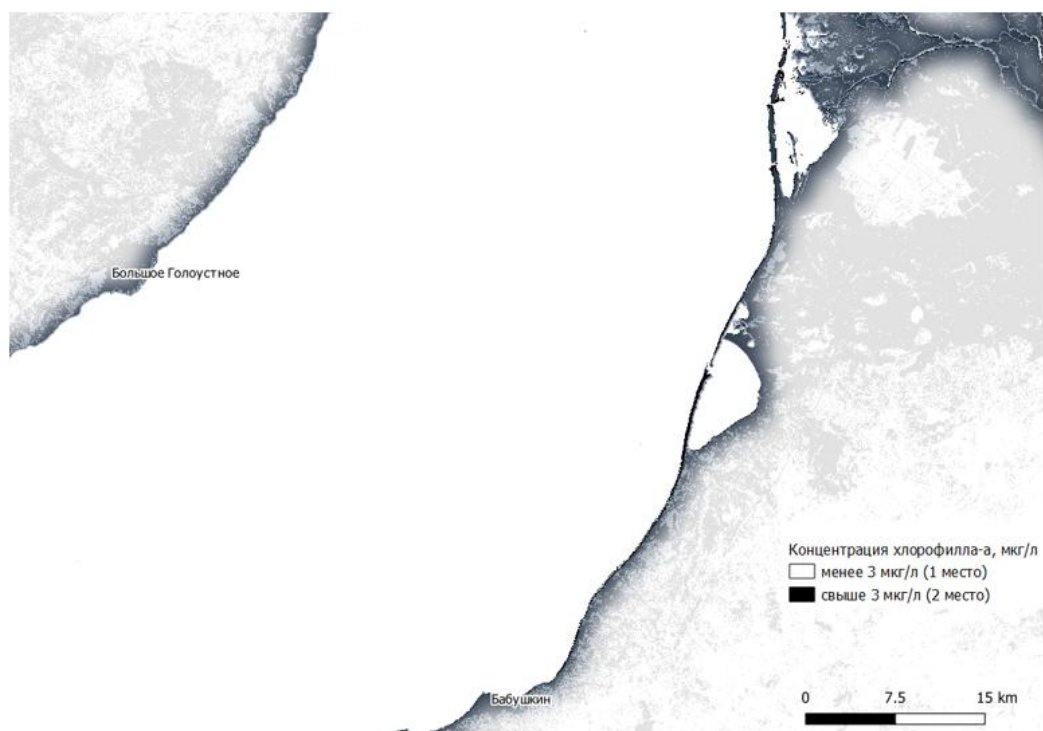


Рис. 4. Определение рангов (мест) по концентрации хлорофилла-а
Fig. 4. Determination of ranks (places) by the concentration of chlorophyll-a

Сравнение значений прозрачности воды по диску Секки также подтверждает правильность отнесения водоема к олиготрофному типу. Для расчета проведем сравнение с пограничным значением 6 м (рис. 5).

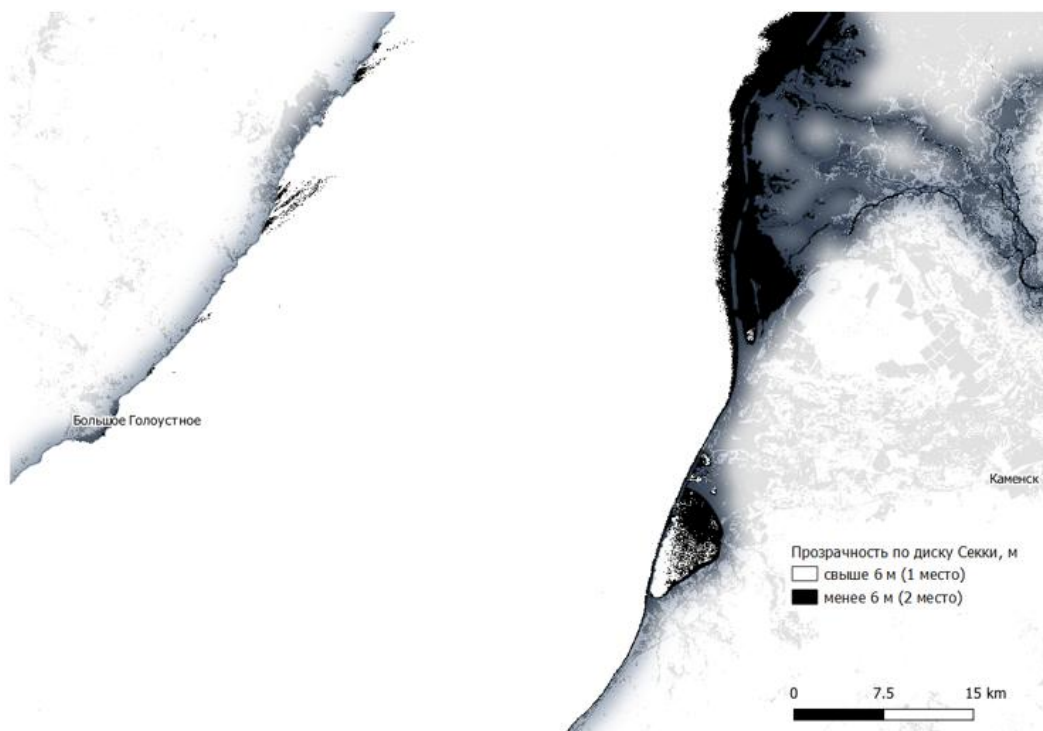


Рис. 5. Определение рангов (мест) по прозрачности воды по диску Секки
Fig. 5. Determination of ranks (places) by the Secchi disk water transparency

Совместим обе растровые модели (рис. 6).

Гидрология
Болданова Е.В.

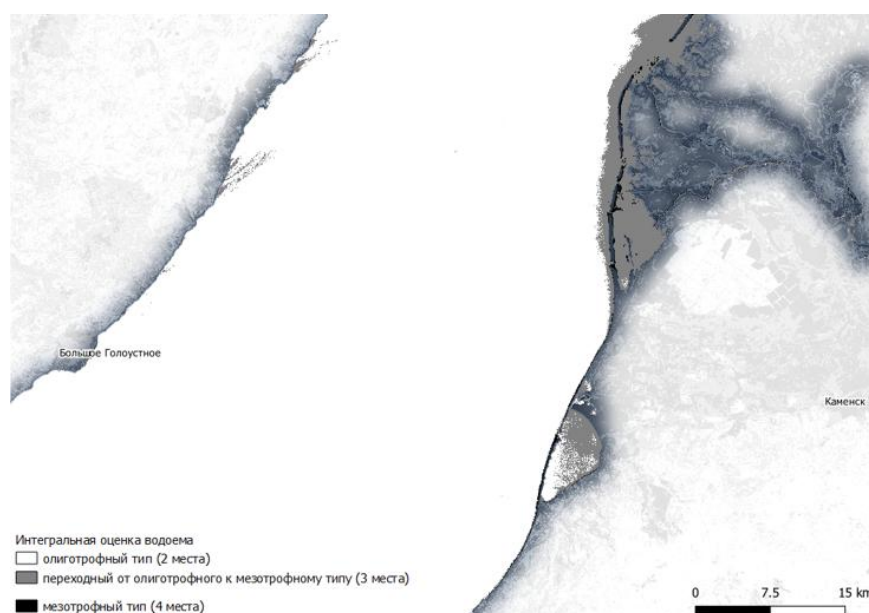


Рис. 6. Интегральная оценка трофности водоема
Fig. 6. Integral evaluation of the water body trophicity

Как видно из расчета, водоем в основном относится к олиготрофному типу. Исключение составляют отдельные участки (на снимке это дельта р. Селенга и соры).

Итогом проведенного исследования является разработка алгоритма оценки трофности водоема по следующим этапам:

1. Подготовка исходных данных:

- подбор спутниковых снимков Sentinel-2 с процентом облачности не более 10% для выбранного водоема в период максимального развития хлорофилла-а (май–июнь);
- проведение атмосферной и радиометрической корректировки снимков, обрезка до нужных размеров при необходимости.

2. Установление границ водоема с использованием индекса NDWI. Обрезка снимка или создание маски по полученной границе.

3. Расчет по модели прозрачности по диску Секки, м.

4. Расчет по модели концентрации хлорофилла-а, мкг/л.

5. Установление пороговых значений для различных типов водоемов. Расчет соответствующих слоев для прозрачности и концентрации хлорофилла-а. Присвоение рангов (мест), соответствующих типам водоемов по двум показателям.

6. Суммирование слоев с полученными рангами (местами) и окончательная идентификация типов водоемов с промежуточными зонами.

Заключение

Результатом данного исследования является проверка возможности использования существующих моделей расчета прозрачности водоемов по диску Секки, концентрации хлорофилла-а для оз. Байкал с использованием данных ДЗЗ Sentinel-2. Выявлена необходимость получения собственных моделей.

На основе данных экспедиций, проведенных Лимнологическим институтом СО РАН, были разработаны модели, демонстрирующие более высокую точность.

Для оценки общей трофности водоемов используются различные биотические и абиотические показатели. Для данного исследования были задействованы один абиотический показатель – прозрачность водоема по диску Секки и один биотический показатель – концентрация хлорофилла-а. Другие показатели не имеют достоверных моделей по оз. Байкал

Гидрология
Болданова Е.В.

(проверено в процессе обработки данных). На основе этих показателей была получена интегральная оценка трофности водоема, где показатели прозрачности водоема и концентрации хлорофилла были включены как ранги (места). Оценка рангов проводилась на основе пограничных значений показателей для олиготрофных и мезотрофных водоемов, предложенных общепризнанными авторами.

Описанный алгоритм обработки космоснимков Sentinel-2 обеспечивает обработку данных за другие периоды.

Проведенное исследование позволит проводить в полуавтоматическом режиме дистанционное исследование оз. Байкал и получать оперативную информацию о его состоянии. Это даст возможность более полно оценивать имеющиеся водные ресурсы, а также решать вопросы экологического мониторинга.

Список источников

1. Алимов А.Ф. О биологической оценке состояния экосистем и качестве воды // Экологическое состояние водоемов и водотоков бассейна р. Невы. СПб.: Изд-во науч. центр РАН, 1996. С. 4–13.
2. Бульон В.В. Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах. СПб.: Наука, 1994. 219 с.
3. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов / Г.Г. Винберг. Минск: Изд-во АН БССР, 1960. 329 с.
4. Голубков М.С., Голубков С.М., Умнова Л.П. Первичная продукция и проблемы эвтрофирования эстуарии р. Невы // Экосистема эстуарии р. Невы. СПб.: Изд-во «Научн. центр. РАН», 2008. С. 313–338.
5. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
6. Донцов А.А., Пестунов И.А., Рылов С.А., Суторихин И.А. Автоматизированный мониторинг площадей акваторий озер и водохранилищ по спутниковым данным // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 4. № 2. С. 38–45.
7. Донцов А.А., Суторихин И.А. Геоинформационная система регистрации гидрологических параметров внутриконтинентальных водных объектов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 1. № 4. С. 74–80.
8. Донцов А.А., Суторихин И.А. Специализированная геоинформационная система автоматизированного мониторинга рек и водоемов // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22. № 5. С. 39–46.
9. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озёр разных природных зон. М.: Наука, 1984. 207с.
10. Кутявина Т.И., Рутман В.В., Ашихмина Т.Я., Савиных В.П. Использование космических снимков для определения границ водоемов и изучения процессов эвтрофикации // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 28–33.
11. Кутявина Т.И., Кантор Г.Я., Ашихмина Т.Я., Савиных В.П. Применение методов обработки и анализа космических снимков для изучения эвтрофированных водоёмов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 2. С. 14–25. doi 10.25750/1995-4301-2020-2-014-025.
12. Одум Г., Одум Э. Энергетический базис человека и природы. М.: Природа, 1978. 380 с.
13. Одум Ю. Экология. М.: Мир, 1986. Т. 1, 2. 328 с., 376 с.
14. Россолимо Л.Л. Изменения лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 143 с.

Гидрология
Болданова Е.В.

15. Русецкая Г.Д., Быкова Д.Ю. Экологически устойчивое и социально-экономически ответственное природопользование в системе острова Ольхон // Известия Байкальского государственного университета. 2020. Т.30. №1. С.7–13.
16. Русецкая Г.Д., Дмытерко Е.А. Особо охраняемые природные территории – инструмент устойчивого управления природопользованием // Известия Байкальского государственного университета. 2017. Т. 27. №4. С. 478–487.
17. Рылов С.А., Пестунов И.А. Определение площадей озер по данным со спутников серии Sentinel-2 // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2019. №5. С. 526–535. doi: 10.17516/1999-494X-0108.
18. Суходолов А.П., Федотов А.П., Макаров М.М., Аношко П.Н., Сорокина П.Г., Колесникова А.В., Жабина Д.А. Перспективы рыбохозяйственного использования Маломорского рыбопромыслового района: экономическая оценка и обоснование // Известия Байкальского государственного университета. 2020. Т. 30. №2. С. 233–244.
19. Тихомиров О.А., Бочаров А.В., Комиссаров А.Б., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Иваньковского водохранилища // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. 2016. №2. С. 230–244.
20. Bonansea M. Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 imagery for water clarity assessment in a reservoir / M. Bonansea, M. Ledesma, R. Bazán, A. Ferral, A. German, P. O'Mill, C. Rodriguez, L. Pinotti // Journal of South American Earth Sciences, 95, 2019. Pp 102–265.
21. Bondarenko, N.A. et al. (2019) Recent changes in the spring microplankton of Lake Baikal, Russia. *Limnologica*, 2019, 75. Pp.19–29.
22. Burns, N.M., Rutherford, J.E. (2001) A monitoring and classification system for New Zealand lakes and reservoirs *J. of Lakes Research and Management*. Vol. 15, Is.4. Pp. 255–271.
23. Cairo, C. et al. (2020). Hybrid chlorophyll-a algorithm for assessing trophic states of a tropical Brazilian reservoir based on MSI/Sentinel-2 data. *Remote Sens.*, 12 (2020). P. 40.
24. Carlson R.E. (1977). A trophic state index for Lakes. *Limnology and Oceanography*, № 22. Pp. 361–369.
25. Delegido J. et al. (2019). Turbidez y profundidad de disco de Secchi con Sentinel-2 en embalses con diferente estado trófico en la Comunidad Valenciana. *Revista de Teledetección*. Pp. 15–24.
26. Elster H.J. (1958). Das limnologische Seetypensystem. Ruckblick und Ausblick. *Verh. Internat. Ver. Limnol.*, 1958. Vol. 13. Pp. 101–120.
27. Gilerson A. et al. (2010) Algorithms for remote sensing of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands. *Opt. Express*. V. 18. No. 23. P. 24109–24125. doi: 10.1364/OE.18.024109.
28. Gitelson A. et al. (2011). Estimation of chlorophyll-a concentration in productive turbid waters using a hyperspectral imager for the coastal ocean: The Azov Sea case study. *Environ. Res. Lett.*, 2011. V. 6. No. 2. Pp.1–6. doi: 10.1088/1748-9326/6/2/024023.
29. Gray S.J. (1992) Eutrophication in sea. Colombo and R. Viviani (Eds). *Marine Eutrophication and Pollution Dynamic*. Olsen and Olsen, Freedensberg. 394 p.
30. Ismai K. et al. (2019) Evaluating the potential of Sentinel-2 satellite images for water quality characterization of artificial reservoirs: The Bin El Ouidane Reservoir case study (Morocco). *Meteorol. Hydrol. Water Manag.*, 2019. Vol. 7. Pp. 31–39.
31. Karydis M. (2009) Eutrophication, assessment of coastal waters based on indicators: a literature review. *Global Nest Journal*. Vol. 11, No. 4. Pp. 373–390.
32. Naumann E. (1921). Einige Grundlinien der regionalen Limnologie. *Lund univer. arsska*. Avd. 2. 17 p.
33. Nixon S.W. (1995). Coastal marine eutrophication: a definition social causes and future concerns. *Ophelia*. Vol. 41. Pp. 199–219.

Гидрология
Болданова Е.В.

34. Ohle W. (1958). Diurnal production and destruction rate of phytoplankton in lake // *Rapp et procesverbaux. Conseil perman internat. explorat. mer.* Vol. 144. Pp. 129–131.
35. Porcella D.B., Larsen D.P. and Peterson S.A. (1980). Index to Evaluate Lake Restoration Ser. Information. *J. of the Environmental Engineering Division*, Vol. 06, Is. 6. Pp. 1151–1169.
36. Rohde W. (1958). Primerproduktion und Seetypen. *Verh. Internat. Ver. Limnol.* Vol. 13. Pp. 121–141.
37. Sakuno Y. et al. (2018) Evaluation of Unified Algorithms for Remote Sensing of Chlorophyll-a and Turbidity in Lake Shinji and Lake Nakaumi of Japan and the Vaal Dam Reservoir of South Africa under Eutrophic and Ultra-Turbid Conditions. *Water*, Vol. 10. Pp. 618.
38. Sòria-Perpinyà X. et al. (2020) Remote sensing of cyanobacterial blooms in a hypertrophic lagoon (Albufera of València, Eastern Iberian Peninsula) using multitemporal Sentinel-2 images. *Science of the Total Environment*. Vol. 698. Pp. 134305.
39. Steel J.H. (1974) *The structure of marine ecosystem*. Harvard Univ. Press, Cambridge. 128 p.
40. Thienemann A. (1921). Seetypen. *Naturwissenschaften*, Vol. 9. Pp. 343–346.
41. Vollenweider R.A. et al. (1998). Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Atlantic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics*, Vol. 9. Pp. 329–357.
42. Vollenweider R.A. et al. (1992) Coastal marine eutrophication, principles and control. *Marine Coastal Eutrophication. The Response of Marine Transitional Systems to Human Impact: Problems and Perspectives for Restoration. Science of the Total Environment Supplement*. Elsevier Scientific, Amsterdam, The Netherlands, Pp. 1–20.

References

1. Alimov, A.F. (1996), On the biological assessment of the state of ecosystems and the quality of water, *Ecological state of reservoirs and watercourses of Neva river basin*, St. Petersburg, Scientific publishing house, Center of the Russian Academy of Sciences, pp. 4–13.
2. Boulion, V.V. (1994), *Patterns of primary production in limnic ecosystems*, St. Petersburg, Nauka.
3. Vinberg, G.G. (1960), *Primary production of reservoirs*, Minsk, Publishing House of the Academy of Sciences of the BSSR.
4. Golubkov, M.S., Golubkov, S.M., Umnova, L.P. (2008), Primary production and problems of eutrophication of the estuary of the Neva River, *Ecosystem of the Neva River Estuary*, St. Petersburg, Publishing House "Nauchn. Centre. RAN", pp. 313–338.
5. Datsenko, Yu.S. (2007), *Eutrophication of reservoirs. Hydrological and hydrochemical aspects*, Moscow, GEOS.
6. Dontsov, A.A., Pestunov, I.A., Rylov, S.A., Sutorikhin, I.A. (2017), Automated monitoring of areas of lakes and reservoirs by satellite data, *Interexpo Geo-Siberia*, vol. 4, no. 2, pp. 38–45.
7. Dontsov, A.A., Sutorikhin, I.A. (2018), Geoinformation system for registration of hydrological parameters of inland water objects, *InterexpoGeo-Siberia*, vol. 1, no. 4. pp. 74–80.
8. Dontsov, A.A., Sutorikhin, I.A. (2017), Specialized geoinformation system for automated monitoring of rivers and reservoirs, *Computational technologies*, vol. 22, no. 5, pp. 39–46.
9. Kitaev, S.P. (1984), *Ecological foundations of bioproductivity of lakes in different natural zones*, Moscow, Nauka.
10. Kutyavina, T.I., Rutman, V.V., Ashikhmina, T.Ya., Savinykh, V.P. (2019), The use of satellite images to determine the boundaries of water bodies and study the processes of eutrophication, *Theoretical and Applied Ecology*, no. 3, pp. 28–33.
11. Kutyavina, T.I., Kantor, G.Ya., Ashikhmina, T.Ya., Savinykh, V.P. (2020), Application of methods of processing and analysis of space images for the study of eutrophicated reservoirs (review) *Theoretical and Applied Ecology*, no. 2, pp. 14–25.
12. Odum, G., Odum, E. (1978), *Energy basis of man and nature*, Moscow, Nature.

Гидрология
Болданова Е.В.

13. Odum, Y. (1986), *Ecology*, Moscow, Mir, vol. 1, 2, 328 p., 376 p.
14. Rossolimo, L.L. (1977), *Changes in limnic ecosystems under the influence of the anthropogenic factor*, Moscow, Nauka.
15. Rusetskaya, G.D., Bykova, D.Yu. (2020), Environmentally Sustainable and Socioeconomically Responsible Management of Natural Resources in The Ecosystem of Olkhon Island, *Bulletin of Baikal State University*, vol. 30, no. 1, pp. 7–13.
16. Rusetskaya, G.D. Dmyterko, E.A. (2017), Nature Conservation Areas as A Tool of Sustainable Natural Resource Management, *Bulletin of Baikal State University*, 2017, vol. 27, no. 4, pp. 478–487.
17. Rylov, S.A., I.A., Pestunov (2019), Assessment of Lakes Areas by Sentinel-2 Satellite Data, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, vol. 12(5), pp. 526–535.
18. Sukhodolov, A.P., Fedotov A.P., Makarov M.M., Anoshko P.N., Sorokina P.G., Kolesnikova A.V., Zhabina D.A., (2020), Prospects of Fish-Husbandry Utilization of Maloye More Fishing Area: Economic Assessment and Substantiation, *Bulletin of Baikal State University*, vol. 30, no. 2, pp. 233–244.
19. Tikhomirov, O.A., Bocharov, A.V., Komissarov, A.B., Khizhnyak, S.D., Pakhomov, P.M. (2016), Use of Sensor Landsat 8 (OLI) for Evaluation of Indicators Turbidity, Color and Chlorophyll Content in Water Reservoir Ivankovskoye, *Bulletin of the Tver State University. Series: Chemistry*, no 2. pp. 230–244.
20. Bonansea, M., Ledesma, M., Bazán, R., Ferral, A., German, A., O'Mill, P., Rodriguez, C., Pinotti, L. (2019), Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 imagery for water clarity assessment in a reservoir, *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 95, pp. 102–265.
21. Bondarenko, N.A., Ozersky, T., Obolkina, L.A., Tikhonova, I.V., Sorokovikova, E.G., Sakirko, M.V., Potapov, S.A., Blinov, V.V., Zhdanov, A.A., Belykh, O.I. (2019), Recent changes in the spring microplankton of Lake Baikal, Russia, *Limnologica*, vol. 75, pp. 19–29.
22. Burns, N.M., Rutherford, J.E. (2001), A monitoring and classification system for New Zealand lakes and reservoirs, *J. of Lakes Research and Management*, vol. 15, is. 4, pp. 255–271.
23. Cairo, C., Barbosa, C., Lobo, F., Novo, E., Carlos, F., Maciel, D., Flores Júnior, R., Silva, E., Curtarelli V. (2020), Hybrid chlorophyll-a algorithm for assessing trophic states of a tropical Brazilian reservoir based on MSI/Sentinel-2 data, *Remote Sens.*, vol. 12, p. 40.
24. Carlson, R.E. (1977), A trophic state index for Lakes, *Limnology and Oceanography*, no 22, pp. 361–369.
25. Delegido, J., Urrego, E. P., Vicente, E., Perpinyà, X. S., Soria, J. M., Sandoval, M. P., Ruiz-Verdú, A., Peña, R., Moreno, J. (2019), Turbidez y profundidad de disco de Secchi con Sentinel-2 en embalses con diferente estado trófico en la Comunidad Valenciana, *Revista de Teledetección*, pp. 15–24.
26. Elster, H.J. (1958), Das limnologische Seetypensystem. Ruckblick und Ausblick, *Verh. Internat. Ver. Limnol.*, vol. 13, pp. 101–120.
27. Gilerson, A., Gitelson, A., Zhou, J., Gulrin, D., Moses, W., Ioannou, I., Ahmed, S. (2010), Algorithms for remote sensing of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands, *Opt. Express*, vol. 18, no. 23, pp. 24109–24125. doi: 10.1364/OE.18.024109.
28. Gitelson, A., Gao, B.C., Li, R.R., Berdnikov, S., Saprygin, V. (2011), Estimation of chlorophyll-a concentration in productive turbid waters using a hyperspectral imager for the coastal ocean: The Azov Sea case study, *Environ. Res. Lett.*, vol. 6, no. 2, pp. 1–6. doi: 10.1088/1748-9326/6/2/024023.
29. Gray, S.J. (1992), Eutrophication in sea. Colombo and R. Viviani (Eds), *Marine Eutrophication and Pollution Dynamic*, Olsen and Olsen, Freedensberg.
30. Ismai, K., Boudhar, A., Abdelkrim, A., Mohammed, H., Mouatassime, S., Kamal, A., Driss, E., Idrissi, E., Nouaim, W. (2019), Evaluating the potential of Sentinel-2 satellite images for

Гидрология
Болданова Е.В.

water quality characterization of artificial reservoirs: The Bin El Ouidane Reservoir case study (Morocco), *Meteorol. Hydrol. Water Manag.*, vol. 7, pp. 31–39.

31. Karydis, M. (2009), Eutrophication, assessment of coastal waters based on indicators: a literature review, *Global Nest Journal*, vol. 11, no 4, pp. 373–390.

32. Naumann, E. (1921), Einige Grundlinien der regionalen Limnologie, *Lund univer. arsska*, avd. 2, 17 p.

33. Nixon, S.W. (1995), Coastal marine eutrophication: a definition social causes and future concerns, *Ophelia*, vol. 41, pp. 199–219.

34. Ohle, W. (1958), Diurnal production and destruction rate of phytoplankton in lake, *Rapp et procesverbaux. Conseil perman internat. explorat. mer.*, vol. 144, pp. 129–131.

35. Porcella, D.B., Larsen D.P. and Peterson S.A. (1980), Index to Evaluate Lake Restoration, *Ser. Information. J. of the Environmental Engineering Division*, vol. 06, is. 6, pp. 1151–1169.

36. Rohde, W. (1958), Primerproduktion und Seetypen. *Verh. Internat. Ver. Limnol*, vol. 13, pp. 121–141.

37. Sakuno, Y., Yajima, H., Yoshioka, Y., Sugahara, S., Abd Elbasit, M., Adam, E., Chirima, J. (2018), Evaluation of Unified Algorithms for Remote Sensing of Chlorophyll-a and Turbidity in Lake Shinji and Lake Nakaumi of Japan and the Vaal Dam Reservoir of South Africa under Eutrophic and Ultra-Turbid Conditions, *Water*, vol. 10, pp. 618.

38. Sòria-Perpinyà, X., Vicente, E., Urrego, P., Pereira-Sandoval, M., Ruíz-Verdú, A., Delegido, J., Soria, J.M., Moreno, J. (2020), Remote sensing of cyanobacterial blooms in a hypertrophic lagoon (Albufera of València, Eastern Iberian Peninsula) using multitemporal Sentinel-2 images, *Science of the Total Environment*, vol. 698, 134305.

39. Steel, J.H. (1974), *The structure of marine ecosystem*, Harvard Univ. Press, Cambridge.

40. Thienemann, A. (1921), Seetypen, *Naturwissenschaften*, vol. 9, pp. 343–346.

41. Vollenweider, R.A., Giovanardi, F., Montanari, G., Rinaldi, A. (1998), Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Atlantic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index, *Environmetrics*, vol. 9, pp. 329–357.

42. Vollenweider, R.A., Marchetti, R., Viviani, R. (1992), Coastal marine eutrophication, principles and control, *Marine Coastal Eutrophication. The Response of Marine Transitional Systems to Human Impact: Problems and Perspectives for Restoration. Science of the Total Environment Supplement*, Elsevier Scientific, Amsterdam, The Netherlands, pp. 1–20.

Статья поступила в редакцию: 05.03.22; одобрена после рецензирования: 24.03.22; принята к опубликованию: 07.06.22.

The article was submitted: 05 March 2022; approved after review: 20 March 2022; accepted for publication: 07 June 2022.

Информация об авторе

Information about the author

Елена Владимировна Болданова

Elena V. Boldanova

кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры отраслевой экономики и
управления природными ресурсами,
Байкальский государственный университет;
664003, Россия, Иркутск, ул. Ленина, 11

Candidate of Economic Sciences, Associate
Professor, Department of Sectoral Economics
and Natural Resources Management, Baikal
State University;
11, Lenina st., Irkutsk, 664003, Russia

e-mail: boldanova@mail.ru