

На правах рукописи



Фроленков Игорь Михайлович

ОЦЕНКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРЭСНОВОДНЫХ ОЗЕР АЛТАЙСКОГО
РЕГИОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Специальность 1.6.21 – Геоэкология (географические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Барнаул – 2021

Работа выполнена в лаборатории гидрологии и геоинформатики
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института водных и экологических проблем
Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН)

Научный руководитель:

СУТОРИХИН ИГОРЬ АНАТОЛЬЕВИЧ, доктор физико-математических наук, профессор

Научный консультант:

ВИНОКУРОВ ЮРИЙ ИВАНОВИЧ, доктор географических наук, профессор

Официальные оппоненты:

ХОДЖЕР ТАМАРА ВИКТОРОВНА, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией гидрохимии и химии атмосферы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Лимнологического института СО РАН, г. Иркутск

ШИБАНОВ ЕВГЕНИЙ БОРИСОВИЧ, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела оптики и биофизики моря Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь

Ведущая организация:

Институт озераведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (ИНОЗ РАН - СПб ФИЦ РАН), г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится « 23 » декабря 2021 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.039.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН) по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института водных и экологических проблем СО РАН и на сайте организации www.iwep.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1, Диссертационный совет.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор географических наук, доцент



И.Д. Рыбкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время большую значимость приобрели вопросы оценки состояния и устойчивости водных экосистем в связи с их использованием в хозяйственных и рекреационных целях. Отмечено снижение качества воды, уменьшение биоразнообразия, заболачивание водоёмов в прибрежной зоне, в том числе в многочисленных малых и крупных озёрах Алтайского региона (Веснина, 2000; Фауна птиц..., 2010; Ревякина, 2005; Козырева, 2011).

На территориях, связанных с агропользованием, основными источниками поступления биогенных веществ в водоёмы являются поверхностный смыв с сельскохозяйственных полей и сбросы животноводческих ферм. Концентрация в воде таких биогенов как нитраты, фосфаты, ионы аммония, представляется исходным показателем процесса эвтрофирования, следствием которого является интенсификация продукционных показателей. Особенности протекания этих процессов, в свою очередь, связаны с рядом абиогенных факторов в конкретных водных объектах, и в первую очередь, с гидролого-гидрохимическими и радиационно-термическими факторами (Жидкова, 2017).

Для определения состояния поверхностных водных объектов используют разные подходы и, соответственно, различные показатели, для многих из которых требуются значительные специализированные предварительные исследования. Выявление геоиндикаторов, позволяющих оперативно оценивать геоэкологическое состояние водных экосистем в целом, а также ранжировать уровни воздействия антропогенной деятельности и природных условий на водосборе в пределах водоема, становится актуальной задачей фундаментальной и прикладной геоэкологии.

Цель диссертационной работы – оценка геоэкологического состояния пресноводных озёр Алтайского региона (Алтайского края и Республики Алтай) на основе оптического индекса геоэкологического состояния (ОИГС), предложенного в качестве геоиндикатора.

Объект исследования: разнотипные пресноводные озёра Алтайского края и Республики Алтай.

Предмет исследования: пространственно-временная изменчивость геоэкологического состояния равнинных и горных озёр Алтайского региона, определяемая гидрооптическими методами.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи:**

- оценить геоэкологическое состояние изучаемых озёр традиционными методами;
- оценить геоэкологическое состояние изучаемых озёр на основе гидрооптических измерений, в том числе в разные сезоны и на разной глубине;
- провести статистический анализ пространственно-временных изменений геоэкологического состояния озёр;
- провести сравнительный анализ геоэкологического состояния озёр, разными методами;
- выявить геоиндикатор, позволяющий проводить комплексную экспресс-оценку геоэкологического состояния разнотипных пресноводных озёр;
- использовать выявленный геоиндикатор (индекс ОИГС) для оценки состояния равнинных (Красиловское, Иткуль, Лапа) и горных (Телецкое) озёр.

Область исследования диссертационной работы соответствует пунктам паспорта специальности **1.6.21 – Геоэкология (географические науки):**

- природная среда и геоиндикаторы её изменения под влиянием урбанизации и хозяйственной деятельности человека: химическое и радиоактивное загрязнение почв, пород, поверхностных и подземных вод и сокращение их ресурсов, наведенные физические поля, изменение криолитозоны (п. 1.8);
- геоэкологический мониторинг и обеспечение экологической безопасности, средства контроля (п. 1.12);

– геоэкологическая оценка территорий. Современные методы геоэкологического картирования, информационные системы в геоэкологии. Разработка научных основ государственной экологической экспертизы и контроля (п. 1.17).

Исходными данными для диссертационной работы являются материалы, собранные автором в экспедиционных исследованиях в 2013–2019 гг., а также данные их камеральной обработки: измерена спектральная прозрачность 4731 пробы воды, определена концентрации хлорофилла "а" в 1356 пробах, определена концентрация общего фосфора в 532 пробах, измерена прозрачность воды по диску Секки (861 измерение). Изучены картографические материалы и аэрокосмические снимки (из открытых источников) как основы для составления карт по распределению гидрооптических показателей по акватории озер.

Научная новизна:

- разработан и апробирован экспресс-метод определения геоэкологического состояния разнотипных пресноводных озёр по гидрооптическим характеристикам;
- определен диапазон изменения спектрального показателя ослабления света исследуемых озёр (Красиловское, Большое Островное, Лапа, Иткуль, Телецкое) на различных глубинах и в разные сезоны года;
- предложен новый индикатор геоэкологического состояния пресноводных озёр равнинных и горных территорий – ОИГС;
- построены картосхемы пространственного распределения ОИГС в озёрах равнинной и горной территории, отличающихся по площади, глубине, трофическому статусу;
- на основании построенных картосхем распределения ОИГС для разнотипных озёр равнинной и горной территории выявлены пространственные изменения их геоэкологического состояния.

Теоретическое и практическое значение:

- значимость работы в рамках решения фундаментальных научных проблем связана с достоверным и убедительным доказательством возможности использования гидрооптических показателей воды и рассчитанных на их основе индексов, для оценки состояния озер;
- на основе разработанного метода возможна экспресс-оценка пространственной и временной динамики геоэкологического состояния пресноводных озёр;
- доказана оптимальность и достаточность использования ОИГС на основе спектрального показателя ослабления света водой при $\varepsilon(\lambda) = 430$ нм для экспресс-оценки геоэкологического состояния;
- материалы работы включены в курсы подготовки специалистов в высших учебных заведениях;
- разработаны патенты по экспресс-оценке геоэкологического состояния водоемов по гидрооптическим показателям.

Методы исследования и достоверность. Достоверность результатов исследования обеспечена использованием 7480 проб, отобранных в соответствии с государственными стандартами, и последующим их анализом на поверенном спектрофотометре «ПЭ-5400УФ» согласно методике ГОСТ, и в химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН (г. Барнаул). Достоверность результатов анализа подтверждена использованием стандартных образцов, а также применением современных статистических методов обработки полученных данных.

Основные результаты исследования были представлены и обсуждались на следующих конференциях: «Шаг в науку» (Барнаул, 2013, 2014, 2016, 2017); «Развитие географических знаний: научный поиск и новые методы исследования» (Иркутск, 2014); «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2015, 2016); XI Сибирском совещании по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2015); «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии» (Барнаул, 2017); «Современные проблемы оптики естественных вод (ONW'2017)» (Санкт-Петербург, 2017); «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2017); «Информационные технологии в исследовании биоразнообразия»

(Иркутск, 2018); «Пресноводные экосистемы – современные вызовы» (Иркутск, 2018); «Водные и экологические исследования в Западной Сибири» (Барнаул, 2021).

Научные публикации. Основные положения диссертации отражены в 21 работе, 4 – в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и 1 – в журнале из перечня международной базы Web of Science. Получено свидетельство о государственной регистрации базы данных «Гидрооптические параметры водоёма Западной Сибири», два патента на изобретение «Способ определения трофического уровня пресноводного водоёма» и «Способ определения уровней геоэкологического состояния пресноводного водоёма с использованием оптического индекса геоэкологического состояния ОИГС».

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, приложений. Основное содержание диссертации изложено на 123 страницах, включает 11 таблиц, 36 рисунков, 3 приложения. Список литературы включает 252 наименования, в том числе 31 на иностранном языке.

Личный вклад. Участие на всех этапах исследований, включая отбор проб озёрной воды, их обработку, проведение экспериментов, систематизацию и анализ, а также анализ картографических материалов и аэрокосмических снимков из ряда открытых источников. Автор принимал непосредственное участие в подготовке статей, тезисов и материалов конференций к публикации, а также в постановке проблемы, методическом обеспечении ее решения, формировании выводов работы.

Благодарности. Автор глубоко признателен научному руководителю д.ф.-м.н., проф. И.А. Суторихину и консультанту д.г.н., проф. Ю.И. Винокурову за всестороннюю помощь при подготовке диссертации. Особую благодарность выражает д.б.н., проф. А.В. Пузанову за ценные советы, к.г.н., доценту Н.Ф. Харламовой за важные рекомендации, научному сотруднику К.В. Марусину за помощь в подготовке графических материалов и освоении ArcGis, д.г.н., доценту Д.В. Черных за рекомендации в формулировках определений, д.б.н., доценту Д.М. Безматерных за полезные замечания и критику на научных семинарах, д.г.н. И.Д. Рыбкиной и к.г.н. Н.Ю. Курепиной за помощь в оформлении работы. Неценима поддержка со стороны д.ф.-м.н., проф. В.И. Букатого, к.т.н. О.Б. Акуловой и заведующего лабораторией гидрологии и геоинформатики д.т.н. А.Т. Зиновьева.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, рассмотрена изученность проблемы, сформулированы цель и основные задачи работы, указаны объект и предмет исследования.

В **первой главе** представлен литературный обзор по теоретическим основам определения геоэкологического состояния водоёмов с использованием различных методов. Выявлены естественные и антропогенные факторы, влияющие на изменение геоэкологического состояния водоёма. Проведен анализ отечественных и зарубежных работ по исследованию гидрооптических характеристик в озёрных экосистемах, которые могут быть использованы как индикаторы геоэкологического состояния.

Во **второй главе** дана краткая физико-географическая характеристика районов исследования. Описан рельеф, климат, даны характеристики исследуемых объектов. Проведен анализ естественных и антропогенных факторов, влияющих на изменение геоэкологического состояния пресноводных озёр Алтайского края и Республики Алтай.

В **третьей главе** приведены экспериментальные данные по определению трофического уровня исследуемых озёр Алтайского региона с помощью индекса Карлсона и ОИГС, рассчитываемого по спектральному показателю ослабления света $\epsilon(\lambda)$. Проведено сравнение между этими методиками и получены корреляционные зависимости, которые показали статистически достоверный результат. Продемонстрировано изменение оптических параметров озёр в зависимости от сезона года.

В **четвертой главе** представлены значения спектрального показателя ослабления света воды на длинах волн 400–800 нм, полученные экспериментальным путем, рассчитан ОИГС. Применялся метод интерполяции (ОВР) с использованием программного обеспечения ArcView. Построены картосхемы распределения спектрального показателя ослабления света $\epsilon(\lambda)$ и ОИГС по акватории озёр и глубинам.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Оптический индекс (ОИГС) на основе спектрального показателя ослабления света $\epsilon(\lambda_{430})$ отражает геоэкологическое состояние пресноводных водоемов, отсутствие, степень влияния антропогенной нагрузки на территорию водосборного бассейна и акваторию.

Объекты исследования входят в состав двух физико-географических стран – Западно-Сибирская страна и Горы Юго-Западной Сибири.

Озёра являются разнотипными по происхождению котловин, характеристикам вмещающих ландшафтов, морфологии и уровню трофности.

Равнинные

Надпойменно-террасное *озеро Красиловское* расположено в правобережной части долины р. Обь в лесостепной зоне на границе третьей, «боровой», и четвертой террас. Оно занимает эрозионную котловину, которая первоначально была создана значительным водотоком, а впоследствии расширена в результате активизации эрозионно-дефляционных процессов. Бессточный водоём питается как поверхностными, так и грунтовыми водами. Трофический уровень – эвтрофно-гиперэвтрофное. Во время исследования 2012–2014 гг. отнесено к эвтрофному типу (по содержанию хлорофилла "а") (Котовщиков, 2015).

Озеро Иткуль расположено на древней надпойменной террасе правого берега Оби, проточное. В период паводка ежегодно Иткуль наполняется водами через систему малых рек, вода его близка по составу к речной. Чаша озера имеет лопастную форму. Конфигурация береговой линии сложная, берега рассечены заливами и бухтами. По трофическому уровню озеро относилось к мезотрофному типу (Веснина, 2000), позже стало относиться к эвтрофному (Суторихин и др., 2017).

Озеро Лана по происхождению и положению в ландшафте относится к пойменным озёрам и принадлежит к придаточной системе правобережной поймы реки Оби. Водоём является непроточным и может сообщаться с рекой только в период весеннего половодья. Вода по солёности относится к α -гипогалинным пресным водам. Трофический уровень – эвтрофный (Суторихин и др., 2017).

Озеро Большое Островное расположено в Касмалинской ложбине древнего стока, является эрозионным по происхождению котловины. Оно расположено в Верхнеобской лесостепной провинции, Приобской левобережной колючно-степной подпровинции в Касмалинском районе (Николаев, 1975). По данным Л. В. Весниной за 1997 г., водоём по видовому составу зоопланктонных сообществ относится к мезотрофному типу, по сапробности – к b -мезосапробному (индекс сапробности $S = 1,86-2,0$). За 2008–2009 гг. озеро относилось к гиперэвтрофному типу (по содержанию хлорофилла "а") (Кириллов и др., 2009).

Горные

Телецкое озеро имеет тектоническое происхождение, в него впадает около 70 рек и более 150 временных водотоков (Селегей и др., 2001), вытекает только р. Бия. По содержанию хлорофилла "а", величине первичной продукции, прозрачности, содержанию биогенных веществ оно относится к ультраолиготрофно-олиготрофным водоёмам (Кириллова, 2006).

Антропогенная нагрузка связана с прямым или косвенным воздействием человека на природную среду в целом или на её элементы (Козин, Петровский, 2005).

В географических исследованиях для оценки антропогенной нагрузки и определения геоэкологического состояния поверхностных водных объектов в зависимости от поставленных задач используют различные подходы и, соответственно, различные показатели.

Так, для оценки антропогенной нагрузки на водосборный бассейн используют такие показатели как плотность населения территории (чел./км²); рекреационная нагрузка (чел./км²); сельскохозяйственная освоенность (распаханность, %), животноводческая нагрузка (количество условных голов КРС на 1 км²).

Данный подход встречается в работах И.Д. Рыбкиной, Н.В. Стоящевой, Н.Ю. Курепиной (2011); О.В. Отто, О.А. Оточкиной (2016). В таблице 1 автореферата представлены природные факторы (площадь водосбора, залесённость, заболоченность и т.д.), в тексте диссертации учтена и антропогенная нагрузка, влияющая на геоэкологическое состояние.

Таблица 1 – Природные условия водосборных бассейнов исследуемых озер

Показатель		Телецкое		Лапа	Красиловское	Иткуль	Большое Островное
Глубина, м		325		11,5	6,5	8,5	5,6
Sводного зеркала, км ²		227,3		0,76	1,4	10,2	28,6
Донные отложения		бескарбонатные терригенные алевролитические глины		пески, суглинки, супеси	пески суглинки	песчано-илистые, черные, серые, чернотурбуристые тонкие илы	пески, песчано-илистые, илистые (сапропели)
Сводосбора, км ²		20 400		2,1*	53,4	464	892
Кол-во притоков, шт.		71		0	0	1	1
Залесенность, %		52		4,7*	2,5*	19	8
Заболоченность, %		3		0	2*	6	3
Грунты (подстилающая, водосборная поверхность)		бурые и серые лесные, галечниковые, гравийные, и песчаные пляжи		аллювиальные засоленные	состав почв и подстилающих отложений песчаный	песчаный	песчаный
Крутизна на склоне	угол наклона, град.	15	50	0	1	8	10
	Уклон, %	28	85	0,93	2,3	14	20

* - данные посчитанные по Google Планета Земля.

Используемые в географии традиционные показатели и индексы (индексы загрязнения воды, бальные оценки и т.д.) (Арманд, 1973; Исаченко, 2001; Кузьмин, 2014) не в полной мере позволяют оценить геоэкологическое состояние водоёма. Предложенный нами ОИГС учитывает комплексное влияние всех этих факторов и позволяет оперативно оценить геоэкологическое состояние разнотипных пресноводных водоёмов.

Расчетная формула имеет вид:

$$ОИГС = \ln(\varepsilon_{430}) = \ln\left(\frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{T}\right)\right), \quad (1)$$

где первичная гидрооптическая характеристика – спектральный показатель ослабления света $\varepsilon(\lambda)$ на длине волны 430 нм, рассчитывался по формуле:

$$\varepsilon(\lambda) = (1/L) \cdot \ln(1/T), \quad (2)$$

где L – длина кюветы, $T = I/I_0$ – прозрачность в относительных единицах, I, I_0 – интенсивности прошедшего и падающего света, соответственно, λ – длина волны света.

Выбор $\varepsilon(\lambda)$ на длине волны 430 нм связан с тем, что свет именно этой длины волны наиболее чувствителен к содержанию в воде взвешенных и растворённых веществ, таких как

органические (желтое вещество) и неорганические соединения, клетки водорослей (хлорофилл), а также минеральная и органическая взвесь.

В численные значения ОИГС в той или иной мере вносят вклад все показатели, используемые в методике А.Г. Исаченко (2001). Таким образом, данная методика оценки геоэкологического состояния представляет полноценную характеристику озёрных процессов, определяемых воздействием на состояние водоёма комплекса зональных и азональных факторов (Рисунок 1).

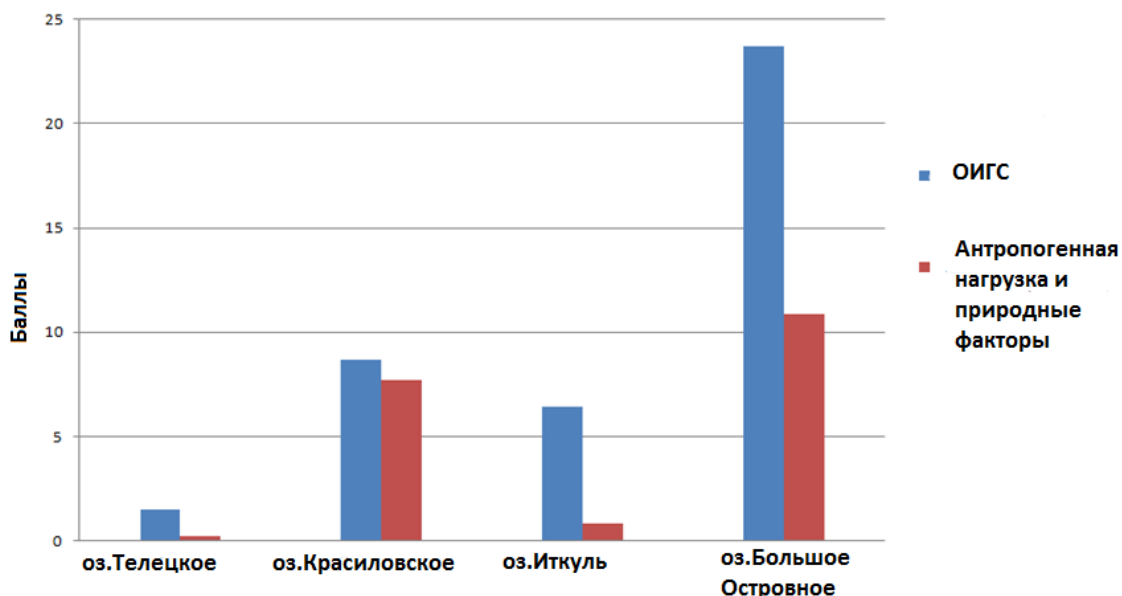


Рисунок 1 – Соотношение ОИГС и антропогенной нагрузки и природных факторов.

Геоэкологическая оценка представляет собой пространственный многопараметрический анализ природно-ресурсного потенциала естественных и антропогенно-измененных ландшафтов с целью определения их возможности устойчиво выполнять задаваемые им социально-экономические функции без нарушения функций жизнеобеспечения (Дмитриев и др., 2016; Осипова, 2016).

Сопоставление относительных и удельных показателей антропогенной нагрузки и природных условий повышает объективность полученных результатов, выявляет территориальные закономерности и связи между источниками загрязнения и объектами среды. Сравнительный анализ этих факторов, воздействующих на водоём, позволяет комплексно оценить состояние территории водосбора.

Сравнение данных показывает (Рисунок 1), что ОИГС увеличивается вместе с увеличением числа баллов по А.Г. Исаченко (2001). Соответственно ОИГС отражает степень антропогенной нагрузки и влияние природных факторов.

2. ОИГС озер, рассчитанный по спектральному показателю ослабления света на длине волны 430 нм, коррелирует с трофностью (гидробиологической характеристикой), определяемой по индексу Карлсона.

На первом этапе исследования была проведена оценка распределения озёр Алтайского края по трофическому статусу, используя индекс Карлсона (Trophic State Index) (Carlson, 1977) (Таблица 2). В основу расчётов TSI положены корреляционные зависимости между параметрами водной среды: прозрачностью по диску Секки (SD), концентрацией хлорофилла a (Хл a) в естественном сообществе фитопланктона и содержанием общего фосфора ($P_{\text{общ}}$).

В настоящее время для оценки трофического уровня водоемов разработано большое количество нумерических шкал. Г.Г. Винберг (1960) в своих работах, характеризуя тип трофности водоемов, использовал численные показатели. Иностранные и отечественные исследователи, используя различные критерии, оценивали трофический уровень с помощью

шкал: Китаев (1984), Романенко (1985), Гутильмахер (1986), Бульон (1983), Likens (1975), Hubel (1966), и др.

Таблица 2 – Соответствие уровней ОИГС трофическому уровню, рассчитанному по спектральному показателю ослабления света

Индекс Карлсона (TSI) (Carlson, 1977)	Трофический уровень водоема (Carlson, 1977)	ОИГС (Суторихин и др., 2019)	Уровень геоэкологического состояния пресноводного (Суторихин и др., 2019)	Степень воздействия (Фроленков и др., 2021)
0-30	олиготрофное	0-0,3	низкий уровень1 (НУ1)	практически отсутствующая
		0,3-0,7	низкий уровень2(НУ2)	очень слабая
40-50	мезотрофное	0,7-0,9	умеренный уровень1(УУ1)	ощутимая
		0,9-1,1	умеренный уровень2(УУ2)	переходная
60-70	эвтрофное	1,1-2,3	средний уровень1(СУ1)	значимая
		2,3-3,1	средний уровень2(СУ2)	повышенная
80 и более	гиперэвтрофное	3,1 и более	высокий уровень(ВУ)	сильная

На втором этапе проведен анализ связи TSI с ОИГС и показателем ослабления света $\epsilon(\lambda_{400-800})$ на всех глубинах озёр (Способ определения..., 2019). Выявлена достоверная положительная корреляция между натуральным логарифмом от численных значений $\epsilon(\lambda_{430})$ и ОИГС на трех озёрах (Красиловское, Лапа и Большое Островное). ОИГС и трофический уровень пресноводных озёр Алтайского края определялся в различные сезоны (Таблица 3).

Таблица 3 – ОИГС и трофический уровень пресноводных озёр Алтайского края по индексу Карлсона и спектральному показателю ослабления света

Озеро	Индекс Карлсона (TSI)	Трофический уровень водоёма	ОИГС	Уровень геоэкологического состояния пресноводного водоема
<i>Август 2013</i>				
Красиловское	58	мезотрофно-эвтрофный	2,1	средний уровень 1
Лапа	54	эвтрофный	1,6	средний уровень 1
Большое Островное	73	эвтрофно-гиперэвтрофный	3,1	средний уровень 2
<i>Май 2014</i>				
Красиловское	68	эвтрофный	2,6	средний уровень 2
Лапа	52	эвтрофный	1,3	средний уровень 1
Большое Островное	74	гиперэвтрофный	3,4	высокий уровень

Продолжение таблицы 3

Озеро	Индекс Карлсона (TSI)	Трофический уровень водоёма	ОИГС	Уровень геоэкологического состояния пресноводного водоема
<i>Июль 2014</i>				
Красиловское	62	эвтрофный	1,9	средний уровень 1
Лапа	60	эвтрофный	2,1	средний уровень 1
Большое Островное	71	эвтрофно-гиперэвтрофный	3,2	высокий уровень
<i>Октябрь 2014</i>				
Красиловское	62	эвтрофный	1,7	средний уровень 1
Большое Островное	70	эвтрофно-гиперэвтрофный	3,1	средний уровень 2
Лапа	58	мезотрофно-эвтрофный	1,9	средний уровень 1
<i>Май 2015</i>				
Большое Островное	58	мезотрофно-эвтрофный	2,9	средний уровень 2
Лапа	53	мезотрофно-эвтрофный	2,6	средний уровень 2
<i>Август 2015</i>				
Красиловское	59	эвтрофный	2,4	средний уровень 2
Большое Островное	69	эвтрофно-гиперэвтрофный	3,1	высокий уровень
Лапа	59	эвтрофный	1,8	средний уровень 1
<i>Октябрь 2015</i>				
Красиловское	62	эвтрофный	1,8	средний уровень 1
Большое Островное	72	эвтрофно-гиперэвтрофный	3,4	высокий уровень
<i>Август 2016</i>				
Лапа	55	эвтрофный	1,9	средний уровень 1
Большое Островное	65	эвтрофный	3	средний уровень 2
<i>Ноябрь 2017</i>				
Красиловское	57	мезотрофно-эвтрофный	2,3	средний уровень 1

Анализ данных позволяет заключить, что ОИГС, рассчитываемый по натуральному логарифму $\varepsilon(\lambda_{430})$, соответствует трофическому уровню водоёмов, определяемому по TSI Карлсона (Суторихин и др., 2017). Соответственно ОИГС подтверждает данные о трофическом уровне озера.

Предложенная методика была подтверждена экспериментом на озеро Иткуль, схожим по генезису с озером Красиловским (Таблица 4).

Таблица 4 – ОИГС и трофический уровень оз. Иткуль по индексу Карлсона

Озеро	Хл a^* , мг/м ³	SD, м	ТР, мг/м ³	ОИГС	TSI	Уровень геоэкологического состояния	Трофический уровень
<i>Июнь 2017</i>							
Иткуль	2,47	1,20	93	1,2	55	средний уровень 1	эвтрофный
<i>Октябрь 2017</i>							
Иткуль	11,55	2,53	93	1,1	56	средний уровень 1	эвтрофный

Озеро Иткуль соответствует эвтрофному трофическому уровню, геоэкологическое состояние по геоиндикатору, согласно предложенной шкале, соответствует среднему уровню 1.

Выявлена достоверная положительная корреляция между ОИГС и трофическим индексом TSI Карлсона ($r=0,92$, $p<0,01$) (Рисунок 2).

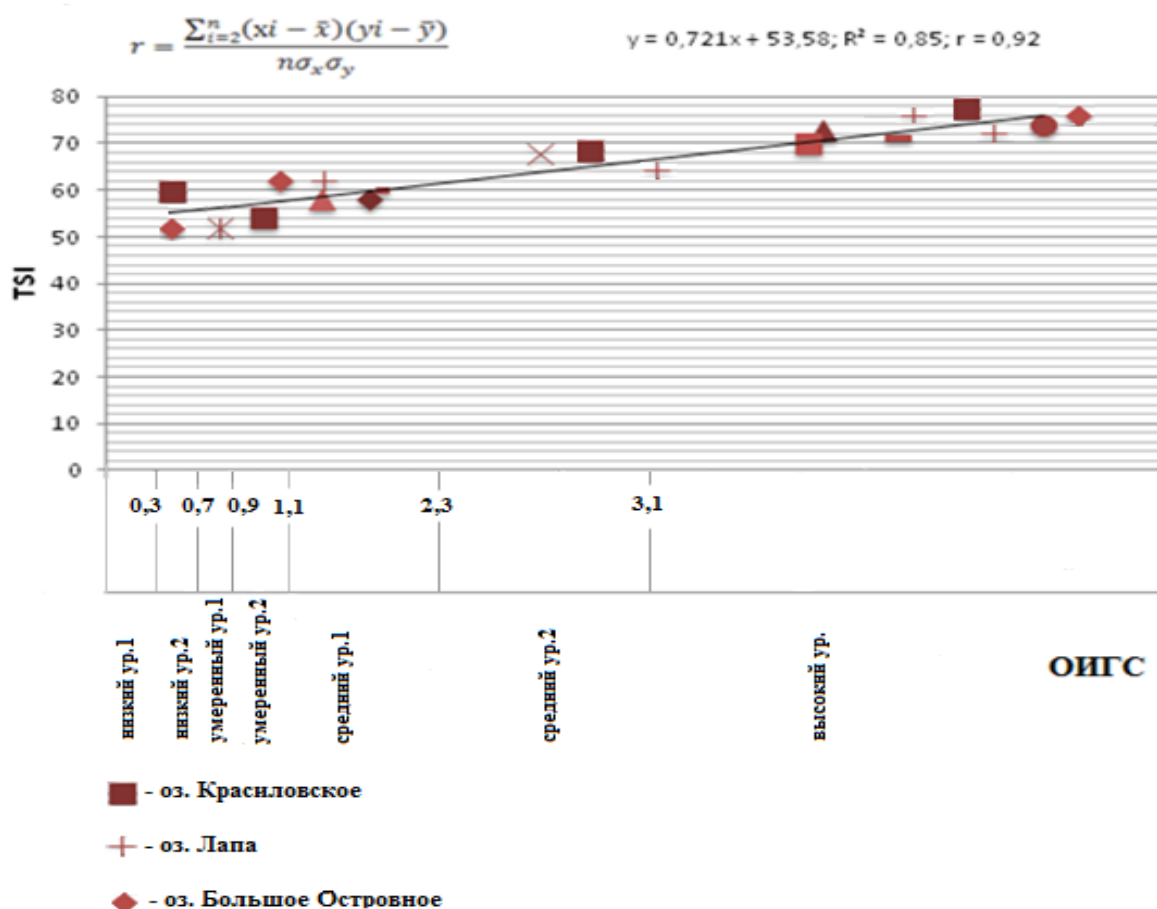


Рисунок 2 – Зависимость между значениями трофического индекса Карлсона (TSI) и ОИГС

Сезонная и пространственная изменчивость связи ОИГС и TSI для озёр Лапа и Большое Островное, представлена на рисунках 3 и 4. Подобные зависимости были выявлены на Цимлянском водохранилище и Таганрогском заливе Азовского моря (Жидкова, 2017; Сухоруков, 2017).

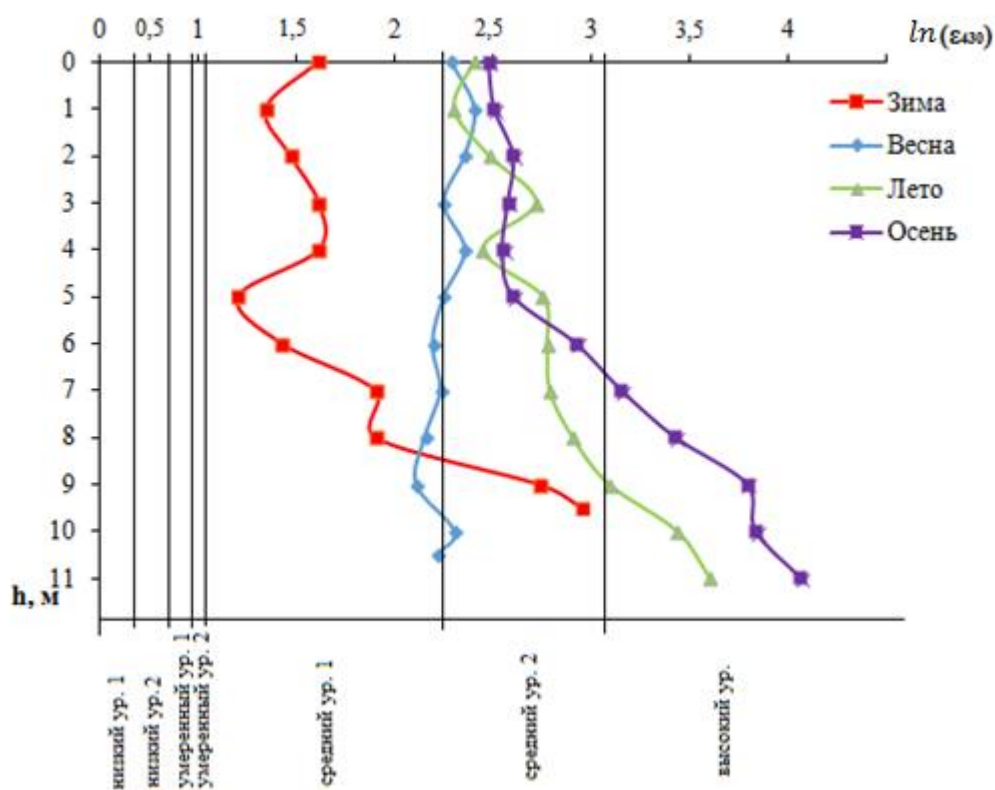


Рисунок 3 – Динамика ОИГС в зависимости от сезона на различных глубинах оз. Лапа, 2016 г.

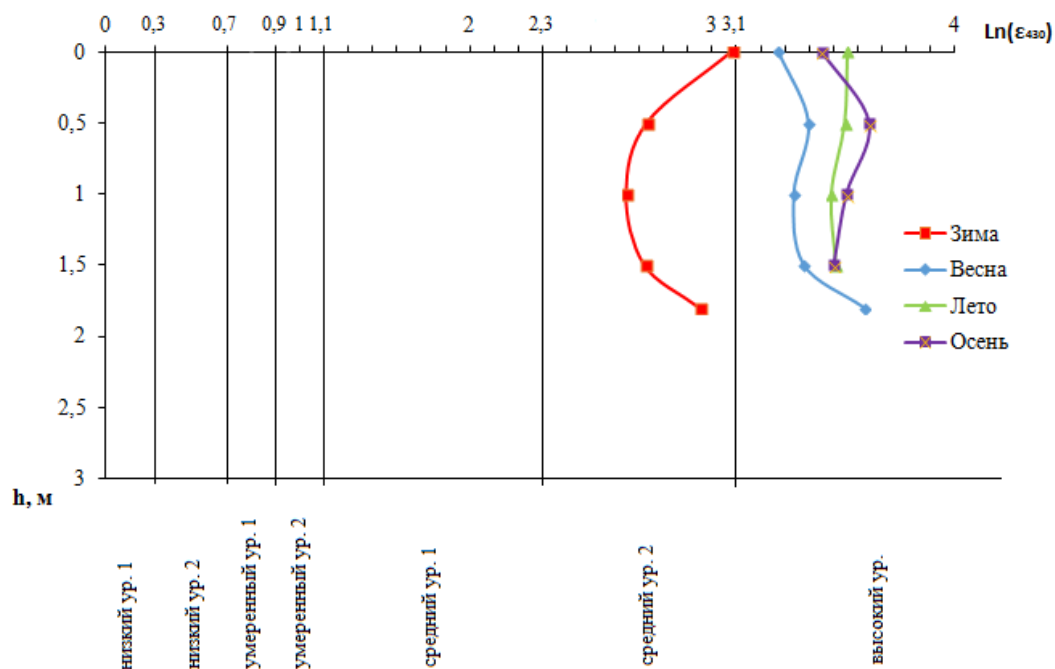


Рисунок 4 – Динамика ОИГС в зависимости от сезона на различных глубинах оз. Большое Островное, 2016 г.

Также для равнинных озёр на примере озера Красиловское был предложен и апробирован метод построения картосхем пространственно-временного распределения уровней ОИГС. Поверхностные пробы воды были отобраны в 34 пунктах, по трансектам показанным на рисунке 5.

Озеро Красиловское подвержено как антропогенному воздействию (с. Озеро-Красилово, туристические комплексы и базы, садоводства), так и влиянию природных факторов. В наиболее глубокой центральной части озера (6-7 м) толщина слоя ила составляет 20-30 см, ОИГС минимальный – 0,7-0,9 (умеренный уровень 1), это обусловлено удаленностью от берегов и наименьшим антропогенным воздействием. На мелководных участках литорали на западе озера, а также заболоченных участках на юге значения ОИГС наибольшие 2,5-3 (средний уровень 2). На этих участках озера глубина составляет 1,5 м, толщина иловых отложений до 50 см.

Максимальные значения ОИГС (3,2, высокий уровень) выявлены на участках озера, прибрежная водоохранная зона которых застроена или присутствуют свалки мусора. В этих частях озера глубина достигает 0,7-1,0 м, а толщина иловых отложений – 1,5 м.

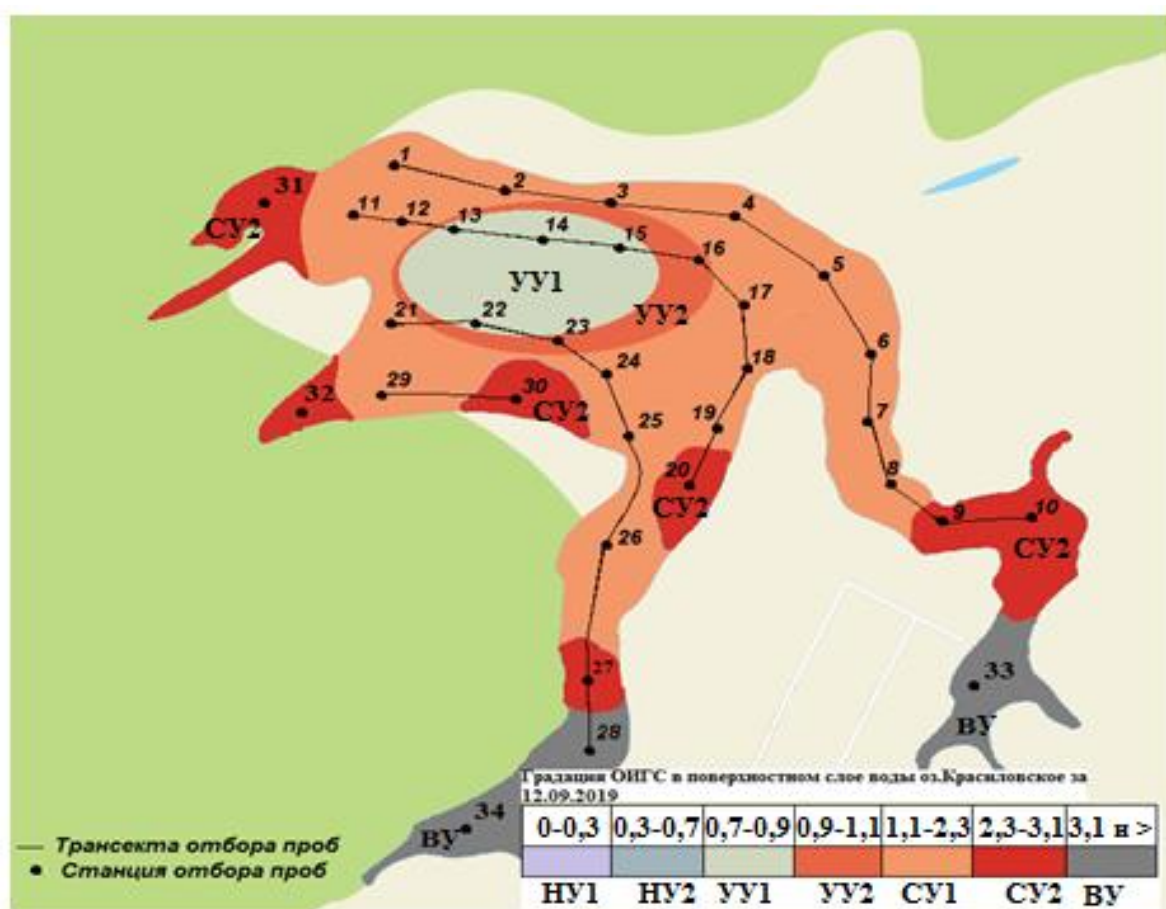
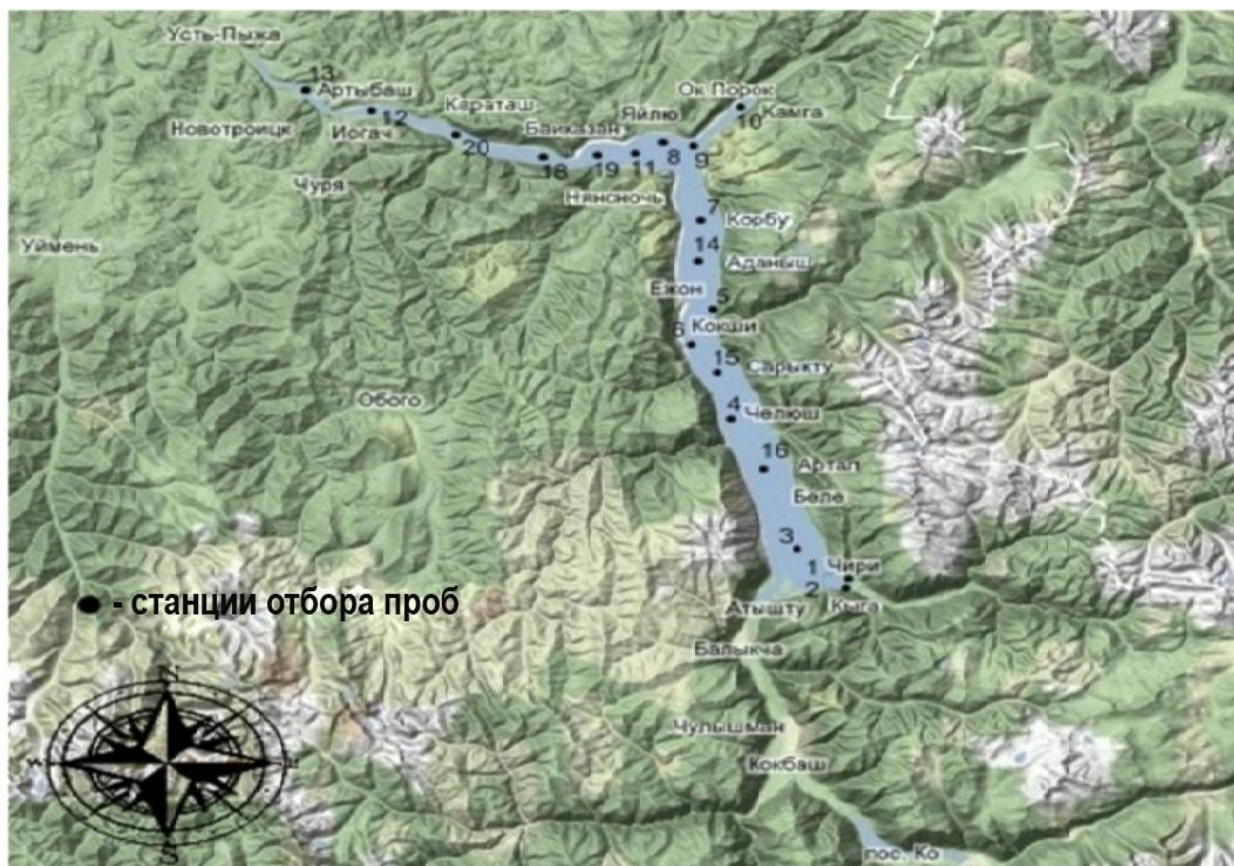


Рисунок 5 – Области интерполяции ОИГС озера Красиловского в поверхностном слое, 12.09.2019 г.

Согласно предложенной методике, проранжированы участки акватории по уровню антропогенного воздействия со стороны водосбора.

3. Пространственно-временная динамика спектрального показателя ослабления света в горных глубоких озерах (Телецкое озеро) в период устойчивой температурной стратификации позволяет оперативно оценить изменение его геоэкологического состояния на разных участках акватории и глубинах.

Для апробации разработанной методики определения ОИГС на горных территориях было выбрано озеро Телецкое тектонического происхождения. Исследования проводились в 2013-2019 гг. по схеме отбора проб (Рисунок 6).



№ станции на карте	Координаты станции отбора проб		Название станции отбора проб
	Широта	Долгота	
1	51,35752°	87,82310°	Чири
2	51,35190°	87,84324°	Кыга
3	51,37797°	87,78595°	Чулышман
4	51,48432°	87,72960°	Челюш
5	51,57246°	87,68117°	Кокши
6	51,56671°	87,66769°	Кокши
7	51,70365°	87,66107°	Корбу
8	51,76655°	87,63532°	Окпорок
9	51,75791°	87,66034°	Камга
10	51,79655°	87,71394°	Камга
11	51,75398°	87,60415°	Яйлю
12	51,80928°	87,30256°	Окпорок-Артыбаш
13	51,78798°	87,30163°	Артыбаш
14	51,67214°	87,68828°	Аданыш
15	51,53638°	87,69930°	Саратки
16	51,45815°	87,74204°	Артал
18	51,75597°	87,40980°	Байказан
19	51,75078°	87,55366°	Нянсночь
20	51,75965°	87,37575°	Караташ

Рисунок 6 – Территориальное расположение станций отбора проб на оз. Телецкое

Фоновым участком на озере для дифференциации и ранжирования антропогенного воздействия и природных факторов выбран Кыгинский залив из-за практически отсутствующего антропогенного воздействия и из-за межгодовой корреляционной сходимости ($r=0,85$, $p<0,01$) данных (Рисунок 7).

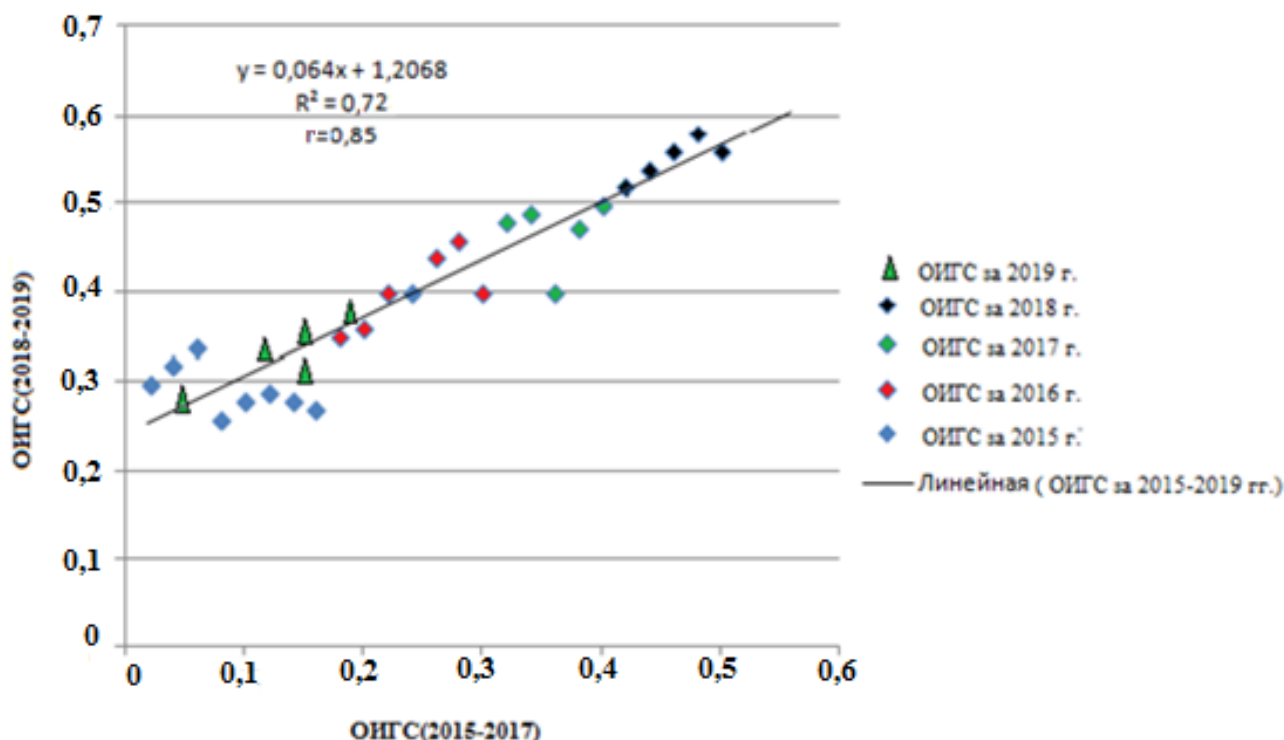


Рисунок 7 – Зависимость величин ОИГС (Кыгинский залив, Чири) за 2015–2019 гг.

На рисунках 8 и 9 приведены картосхемы акватории озера с пространственным распределением значений ОИГС. Самые высокие показатели ОИГС наблюдаются в акватории у поселков Артыбаш и Иогач (Рисунок 8), наиболее подверженных антропогенному воздействию. Наибольшее антропогенное влияние связано с большим количеством водомоторных судов, осуществляющих грузовые и пассажирские перевозки. Следующим значимым фактором является рекреационная нагрузка. Туристические базы, палаточные стоянки, а также поверхностный смыв загрязняющих веществ с неорганизованных свалок вносят вклад в загрязнение берега и акватории.

В Кыгинском заливе значения ОИГС наименьшие по озеру, причем в поверхностном слое пелагиали ОИГС=0,1-0,3 (низкий уровень 1) ниже, чем в литорали – 0,4 (низкий уровень 2). На глубине 10 м в пелагиали ОИГС имеет значение 0,2 (низкий уровень 1) (Рисунок 9). Данный участок находится в зоне Алтайского природного биосферного заповедника, где полностью отсутствует антропогенное воздействие. На этом участке влияние оказывают только естественные процессы.

В направлении от середины озера к берегу значения ОИГС возрастают от 0,4-0,5 (низкий 2) и 0,8 (умеренный 1) до 1,36 (средний 1). Самые максимальные значения в прибрежной части водоёма ОИГС составляет 2,4, что соответствует среднему уровню 2.

Таким образом, на отдельных участках акватории Телецкого озера опробована возможность построения картосхем пространственно-временного распределения уровней ОИГС как элемента оценки геоэкологического состояния акватории.

Согласно предложенной методике, проранжированы участки акватории по уровню воздействия со стороны водосбора. На Телецком озере выбраны участки с фоновым значением ОИГС, относительно которых определялся антропогенный вклад и влияние природных условий, которые приведены на рисунках 8, 9.

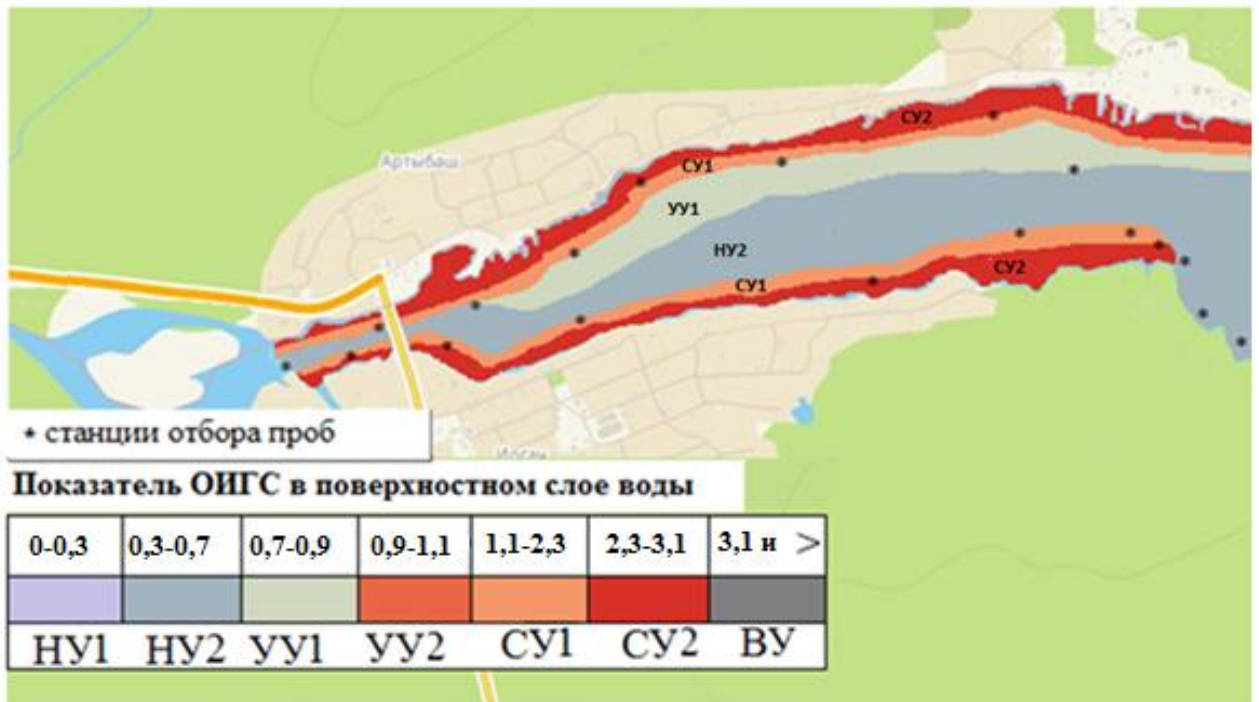


Рисунок 8 – Области интерполяции ОИГС оз. Телецкого в поверхностном слое в районе п. Артыбаш и Иогач, 2019 г.

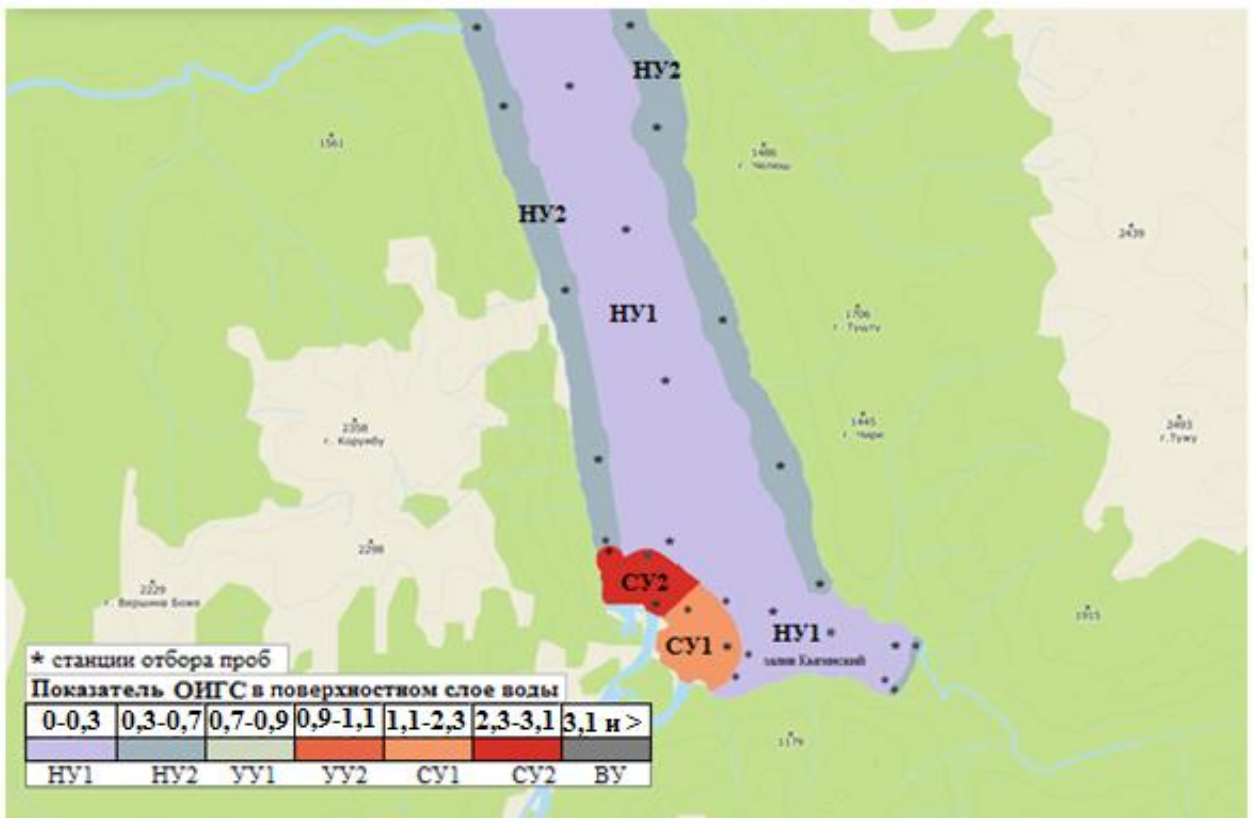


Рисунок 9 – Области интерполяции ОИГС оз. Телецкого в районе Кыгинского залива (фоновый участок) и в устьевой части р. Чулышман, 2019 г.

Выводы

1. На основании данных экспедиционных исследований и обобщения опубликованных материалов по антропогенной нагрузке (плотность населения, животноводческая и рекреационная нагрузка, распаханность территории водосбора) и природным условиям (площадь водосбора, залесенность, заболоченность и другие) проведена балльная оценка геоэкологического состояния изучаемых озер и их водосборных бассейнов. Выявлены территориальные особенности и связи между источниками загрязнения и водными объектами.

2. ОИГС, рассчитанный по спектральному показателю ослабления света на длине волны 430 нм, является наиболее объективным показателем геоэкологического состояния озера, так как чувствителен к содержанию в воде взвешенных (минеральная и органическая взвесь) и растворённых (органическое (желтое) вещество, неорганические соединения, хлорофилл водорослей) веществ.

3. Установлены достоверная положительная корреляции между ОИГС и трофическим индексом TSI (Trophic State Index) Карлсона и соответствие ОИГС с оценкой геоэкологического состояния по методу балльных оценок А.Г. Исаченко.

4. Разработанный ОИГС является комплексным геоиндикатором, позволяющим оперативно оценить геоэкологическое состояние разнотипных как горных, так и равнинных озер. Горное Телецкое озеро характеризуется более низкими показателями ослабления света в целом.

5. Проведенная на основе ОИГС геоэкологическая оценка участков акватории глубоководного Телецкого и мелководного Красиловского озер позволила проранжировать участки с разной степенью антропогенного воздействия.

6. Выявленная сезонная динамика ОИГС отражает сезонное изменение геоэкологического состояния озер, связанное с изменениями как внутриводоемных процессов, так и на водосборе.

Публикации по теме диссертации, отражающие основные научные результаты

Статьи в научных журналах Web of Science

Vinokurova, G.V. Analysis of the State of Biological Communities in a Continental Water Body using Hydrooptical Characteristics / G.V. Vinokurova, I.A. Sutorikhin, A.A. Kolomeitsev, **I.M. Frolenkov** // *Inland Water Biology*. – 2021. – Vol. 14. – №2. – P. 159–167.

Статьи в научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертации

Суторихин, И.А. Пространственный анализ изменения спектрального показателя ослабления света в поверхностном слое воды Телецкого озера в период летнего прогрева / И.А. Суторихин, **И.М. Фроленков** // *Естественные и технические науки*. – 2018. – №11. – С. 221–224.

Суторихин, И.А. Спектральная прозрачность воды на различных глубинах акватории Телецкого озера / И.А. Суторихин, **И.М. Фроленков**, М.Е. Литвих. // *Естественные и технические науки*. – 2016. – №11(101). – С. 110–113.

Суторихин, И.А. Определение трофического статуса пресноводных озёр Алтайского края в период 2013–2016 гг. по гидрооптическим характеристикам / И.А. Суторихин, О.Б. Акулова, В.И. Букатый, **И.М. Фроленков** // *Известия АлтГУ*. – 2017. – №1/1. – С. 58–61.

Суторихин, И.А. Оценка трофического статуса Телецкого озера по данным гидрооптических измерений в видимом диапазоне / И.А. Суторихин, **И.М. Фроленков** // *Известия АлтГУ*. – 2017. – №4(88). – С. 67–71.

Патенты и свидетельства:

Способ определения трофического уровня пресноводного водоема : пат. 2695154 Рос. Федерация. №2018134895 : заявл. 02.10.18 : опубл. 22.07.19, Бюл. № 21. 7 с.

Способ определения уровней геоэкологического состояния пресноводного водоема с использованием оптического индекса геоэкологического состояния ОИГС : пат. 2750141 Рос. Федерация. №2020140847 : заявл. 10.12.20 : опубл. 22.06.21, Бюл. № 18. 12 с.

Гидрооптические параметры водоёма Западной Сибири : Свидетельство о государственной регистрации базы данных 2018621910 Рос. Федерации. №2018621374 : заявл. 04.10.18; опубл. 03.12.18. 6 с.

Статьи в научных сборниках и периодических научных изданиях

Dontsov, A.A. Geographic information system for bloom monitoring inland water bodies / A.A. Dontsov, I.A. Sutorikhin, **I.M. Frolenkov** // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2020. – Vol. 4 (SI: 7VBC). – P. 914–915.

Sutorikhin, I.A. Hydro-optical method for assessing geoecological state of reservoirs / I.A. Sutorikhin, A.A. Kolomeitsev, S.A. Litvinenko, **I.M. Frolenkov** // *Limnology and Freshwater Biology* 2020. – Vol. 4 (SI:7VBC). – P. 630–631.

Vinokurova, G.V. Comparative analysis of ecological state of winter and summer phytoplankton in drainless mesotrophic lake (Altai krai, Russia) / G.V. Vinokurova, I.A. Sutorikhin, A.A. Kolomeitsev, **I.M. Frolenkov** // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. – 2018. – Vol. 9. – №5. – P. 1285–1297.

Суторихин, И.А. Концентрация хлорофилла "а" в разнотипных озерах Алтайского края в 2012–2015 гг. / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, О.М. Фроленков, **И.М. Фроленков** // *Ползуновский вестник*. – 2015. – №4. – Т.1. – С. 99–101.

Суторихин, И.А. Изменение концентрации хлорофилла и спектральной прозрачности воды на различных глубинах акватории Телецкого озера / И.А. Суторихин, **И.М. Фроленков** // *Ползуновский Альманах*. – 2016. – №2. – С. 96–101.

Суторихин, И.А. Влияние водной взвеси на суточный ход спектральной прозрачности озерной воды / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, О.М. Фроленков, **И.М. Фроленков** // *Ползуновский Альманах*. – 2016. – №2. – С. 108–111.

Материалы научных мероприятий

Винокурова, Г.В. Состав, структура фитопланктона, концентрация хлорофилла и гидрофизические параметры воды оз. Красиловское в начале весны при условии ледостава / Г.В. Винокурова, А.А. Коломейцев, И.А. Суторихин, **И.М. Фроленков**, О.М. Фроленков // *Труды III Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии», 28 августа – 1 сентября 2017 г.* – С. 55–63.

Суторихин, И.А. Гидрооптические параметры Телецкого озера в оценке его геоэкологического состояния / И.А. Суторихин, **И.М. Фроленков**, А.А. Коломейцев, С.А. Литвиненко // II Международная конференция «озера Евразии: проблемы и пути их решения» Казань, 19 – 24 мая 2019 г. – Екатеринбург, 2019. – С. 328–333.

Суторихин, И.А. Изменение спектральной подводной освещенности пресноводных озер по глубине / И.А. Суторихин, А.А. Коломейцев, И.М. Фроленков // *Тезисы докладов XXV Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск 1-5 июля 2019 г.* – С. 57.

Суторихин, И.А. Измерение концентрации хлорофилла "а" в разнотипных озерах Алтайского края / И.А. Суторихин, В.И. Букатый, О.М. Фроленков, **И.М. Фроленков** // *Материалы XVI международной научно-технической конференции «ИКИ-2015», 12 мая 2015 г.* – С. 76–80.

Суторихин, И.А. Спектральная прозрачность воды Телецкого озера / И.А. Суторихин, **И.М. Фроленков**, У.И. Янковская // *Материалы XVII международной научно-практической конференции «ИКИ-2016», 19 мая 2016 г.* – С. 189–194.

Суторихин, И.А. Спектральная прозрачность воды Телецкого озера в летний период 2015–2016 гг. / И.А. Суторихин, **И.М. Фроленков** // IX Всероссийская конференция «Современные проблемы оптики естественных вод», Санкт-Петербург, 20–22 сентября 2017 г. – С. 16–19.

Суторихин, И.А. Спектральная прозрачность поверхностного слоя воды Телецкого озера в летний период 2015-2016 гг. / И.А. Суторихин, **И.М. Фроленков** // Материалы XVII конференции молодых ученых ИВЭП СО РАН «Шаг в науку», 7 февраля 2017г.– С.146–154.

Фроленков, И.М. Оценка трофического состояния пресноводных озер по гидрооптическим характеристикам / **И.М. Фроленков**, О.М. Фроленков, И.А. Суторихин // Материалы XVI конф. молодых ученых ИВЭП СО РАН «Шаг в науку», 10 февраля 2016 г. – С. 85–92.

Донцов, А.А. Геопортальная система мониторинга параметров внутриконтинентальных водных объектов / А.А. Донцов, И.А. Суторихин, А.В. Котовщиков, **И.М. Фроленков** // Тезисы доклада на Международную научную конференцию «Информационные технологии в исследовании биоразнообразия» г. Иркутск 11-14 сентября 2018 г. – Иркутск : ИДСТУ СО РАН, 2018 г. – С. 67–68.

Фроленков, И.М. Гидрооптический метод оценки геоэкологического состояния пресноводных водоемов / **И.М. Фроленков**, И.А. Суторихин // Тезисы докладов XXI научной онлайн-конференции молодых ученых «Водные и экологические исследования в Западной Сибири», 4 февраля 2021 г.– С.29.