

УДК 504.54

**РАЗВИТИЕ МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ
ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА
И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ****Архипов Д.Э., Едемский К.Е., Кожевникова С.И., Дмитриев В.В.***Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,**e-mail: v.dmitriev@spbu.ru*

Целью исследования является интегральная оценка экологического статуса (ЭС) водоема на основе моделей-классификаций интегративных свойств (продуктивность, качество воды, потенциальная устойчивость); оценка экологических функций водной экосистемы и факторов, их определяющих на примере малого озера. Для работы использовались результаты полевых исследований на ключевом объекте – оз. Суури в северо-восточном районе Карельского перешейка, выполненные в 2016-2021 гг. Реализованы модели-классификации интегральной оценки экологического статуса водоема. В оценке учитывалось параметрическое сочетание продукционного потенциала системы, качества среды и потенциальной устойчивости водоема, представленное соответствующими субиндексами. Построение интегральных показателей выполнялось для равновесных условий внутри уровней (блоков) и между ними. Выполнена серия экспериментов для отработки технологии построения интегральных показателей и проверки рабочих гипотез: 1 – гипотезы о необходимости построения разных моделей-классификаций для оценки ЭС объектов исследований; 2 – гипотезы о возможности учета разных моделей потенциальной устойчивости систем при оценке ЭС; 3 – гипотезы о вариантности представления оценочных шкал для субиндексов. Рассмотрены результаты интегральной оценки ЭС ключевого водоема. Показано, что в течение 5 лет оз. Суури было способно сохранить свой ЭС (III класс, ближе к левой границе класса). Выполнена сравнительная оценка факторов, определяющих биопродукционную услугу первичного звена трофической цепи – продукции фитопланктона в озере.

Ключевые слова: интегральная оценка, интегральный показатель, субиндекс трофности, субиндекс качества воды, субиндекс устойчивости экосистемы, модель-классификация, моделирование экологических функций

**DEVELOPMENT OF MONITORING OF WATER BODIES BASED
ON INTEGRATED ASSESSMENT OF ECOLOGICAL STATUS
AND MODELING OF ECOLOGICAL FUNCTIONS****Arkhipov D.E., Edemsky K.E., Kozhevnikova S.I., Dmitriev V.V.***Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, e-mail: v.dmitriev@spbu.ru*

The aim of the study is an integral assessment of the ecological status (ES) of a reservoir based on classification models of integrative properties (productivity, water quality, potential sustainability); assessment of the ecological functions of the aquatic ecosystem and the factors that determine them on the example of a small lake. For the work, the results of field studies were used at a key object – Lake. Suuri in the northeastern region of the Karelian Isthmus performed in 2016-2021. Models-classifications of the integral assessment of the ecological status of the reservoir have been implemented. The assessment took into account the parametric combination of the production potential of the system, the quality of the environment and the potential stability of the reservoir, represented by the corresponding sub-indices. The construction of integral indicators was carried out for equilibrium conditions within the levels (blocks) and between them. A series of experiments was carried out to test the technology for constructing integral indicators and test working hypotheses: 1 – hypotheses about the need to build different classification models to assess the ES of research objects; 2 – hypotheses about the possibility of taking into account different models of potential stability of systems in the assessment of ES; 3 – hypotheses about the variance in the presentation of rating scales for subindices. The results of the integrated assessment of the ES of a key water body are considered. It is shown that within 5 years the lake. Suuri was able to keep her ES (III class, closer to the left border of the class). A comparative assessment of the factors that determine the bioproduction service of the primary link in the trophic chain – the production of phytoplankton in the lake has been carried out.

Key words: integral assessment, integral indicator, productivity sub-index, water quality sub-index, ecosystem stability sub-index, classification model, modeling of ecological functions

Развитие мониторинга водных объектов и оценки состояния водных экосистем в наши дни сопровождается разработкой и совершенствованием методов: 1 – сбора, хранения, обработки и разноаспектной визуализации натурной информации о состоянии гидрологических систем и их свойств; 2 – оценки интегративных (эмерджентных) свойств и функций водных объектов; 3 – оценки системного статуса водных объек-

тов (гидрологического, гидрохимического, экологического); 4 – моделирования процессов, водных экосистем, их ответной реакции на естественные и антропогенные воздействия; 5 – системного нормирования нагрузок на водные объекты. В паспорте научной специальности 1.6.16 (бывш. 25.00.27) «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия» закреплена «разработка теории и методологии гидроэкологии,

изучения водных экосистем» [1, п.9; 2]. В п.10 паспорта также отмечена необходимость развития «научных основ обеспечения гидроэкологической безопасности территорий», «оптимальных условий существования водных и наземных экосистем» [1, п.10]. Использование антропоцентризма, био- и экоцентризма, совмещения подходов в развитии гидроэкологии, изучения водных экосистем рассмотрено нами в [3]. Общие особенности подходов раскрыты на рис.1. Отметим, что совмещение подходов на геосистемной основе дает преимущество в исследовании природных систем за счет междисциплинарности, учета антропо-, био- и экоцентризма в становлении рационального природопользования, исследования интегративных свойств и экосистемных функций.

В современных российских исследованиях используется гидрологическая, экологическая, гидро- и геоэкологическая терминология, развиваются методология и методы гидрологических, гидро- и геоэкологических, водно-экологических исследований водоемов; анализируются результаты изучения гидрологических, гидрофизиче-

ских процессов и экосистем озер России, прежде всего, таких как Байкал, Ладожское, Онежское, Каспийское море, а также прогностические оценки трансформации их экосистем в зависимости от изменений климата и антропогенных воздействий [4].

Зарубежные исследования ЕС главным образом нацелены на выполнение Рамочной Директивы по водным ресурсам (РДВ, WFD) для того, чтобы гарантировать доступность населению воды высокого качества. На основе данных Европейского агентства по окружающей среде до 2010 года только 38% рек были отнесены к классам «хорошего» или «высокого» экологического статуса. Современными мониторинговыми исследованиями установлено, что 56% рек и 44% озер в ЕС в наши дни имеют «менее чем хороший» экологический статус. Мониторинг показал, что в последние годы ситуация в значительной степени не изменилась. Для решения этих проблем ЕС запланировал пересмотр РДВ с учетом потенциальных последствий изменения климата и отложил крайний срок достижения целевых показателей по экологическому статусу водных объектов в ЕС на 2027 год [5,6,7].

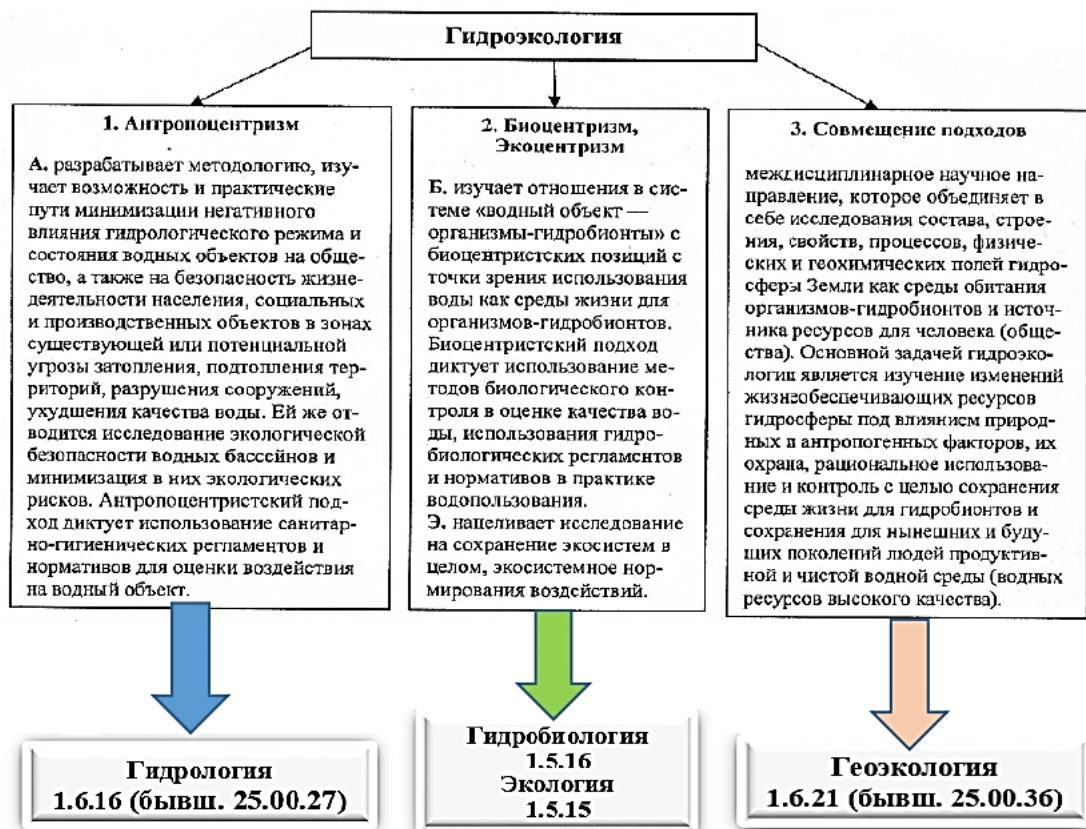


Рис. 1. Антропо-, био-, экоцентризм и совмещение подходов в современных гидроэкологических исследованиях

Целью исследования является интегральная оценка экологического статуса водоема на основе моделей-классификаций интегративных свойств (трофность, качество воды, потенциальная устойчивость); моделирование экологических функций водной экосистемы и факторов, их определяющих на примере малого озера в северо-восточном районе Карельского перешейка.

Задачами и акцентами работы являются также: 1 – исследование, анализ и оценка состояния водных объектов, их ретроспективного, современного и будущего статуса; 2 – развитие методов анализа и оценки системных эффектов – эмерджентных (интегративных) свойств водных объектов (продуктивность, качество воды, устойчивость, экологический статус); 3 – анализ и оценка системных функций водных объектов; 4 – экологическое (системное) нормирование нагрузок на водные объекты и их экосистемы, оценка их ответной реакции на внешнее воздействие.

Материалы и методы исследования

Создание и развитие теории, методологии, методов, моделей интегральной оценки экологического статуса, экологического благополучия и факторов, обуславливающих изменение экологических функций водных объектов, развивается в Институте наук о Земле и на кафедре Гидрологии суши СПбГУ в рамках научного направления «Исследование сложных систем в природе и обществе, их эмерджентных свойств и функций», при поддержке РАН – свидетельство №0303 (26.01.2021). Основные определения, используемые подходы и методы обобщены в ряде публикаций последних лет [3,8,9]. Методология исследований основана на оригинальном подходе, совмещающем все этапы мониторинга водных объектов и их экосистем (наблюдения, оценка, прогноз). Этапы исследования подробно рассмотрены в указанных публикациях и других работах. Ключевым моментом является изучение интегративных (эмерджентных) свойств и функций эко- и геосистем на основе построения интегральных показателей (продуктивности, качества, устойчивости, благополучия, экологического статуса и др.) системных свойств. Использование разных моделей-классификаций и разных методов: метод сводных показателей (МСП), метод рандомизированных сводных показателей (МРСП), АСПИД-методология (анализ и синтез показателей с учетом дефицита информации о критериях и приоритетах оценивания) [10], методов экологического моделирования водных экосистем [9], дает возможность оценить достоверность полученных результатов и точ-

ность полученных оценок интегральных показателей. Студенты кафедр участвуют в проведении исследований и выполнении работ по грантам [3,8,9].

Сбор натуральных данных о состоянии ключевых водных объектов проводится в связи с выполнением работ по научным проектам, грантам и при реализации полевых практик для студентов кафедр. Пример результатов исследования авторами ключевого водоема на учебно-научной базе СПбГУ «Приладожская» в районе п. Кузнечное в 2021 г. приведен на рис. 2.

Студентами кафедры Гидрологии суши выполнен обширный комплекс водно-экологических наблюдений за химическим и биологическим составом и физическими свойствами среды в оз. Большое Волковское (Суури) в период летней полевой практики. В ходе работ результаты выполненных исследований сопоставляются с ретроспективными данными и обобщаются в базах данных натуральных наблюдений за разные годы. Для разноаспектной визуализации собранной информации используются ГИС, статистические методы. В процессе работы выполняются метеорологические, гидрологические, гидрохимические, гидробиологические наблюдения; съемки озера, суточные станции, исследуются продукция и деструкция органического вещества; факторы, влияющие на продуцирование и деструкцию органического вещества в водоеме, оценивается количество образовавшегося органического вещества, самоочищение водоема, зарастание озера. На основе покомпонентного анализа и МСП оцениваются: трфность, качество воды, различные виды устойчивости (потенциальная, устойчивость к эвтрофированию, к изменению качества воды). Эти результаты используются в дальнейшем для оценки экологического статуса и экологического благополучия водоемов; моделирования внутригодового цикла развития водной экосистемы.

Результаты исследования и их обсуждение

Заявленная в цели работы интегральная оценка экологического статуса водоема на основе разработки многокритериальных и многоуровневых моделей-классификаций интегративных свойств реализуется на основе сравнения результатов двух моделей-классификаций «М1» и «М2» (рис.3), разработанных в 2020 г. [8] и в 2021 г. – авторами статьи. Для работы использовались результаты полевых исследований на оз. Суури, выполненные в 2016-2021 гг. В процессе работы были проверены три основные гипотезы, приведенные в таблице.

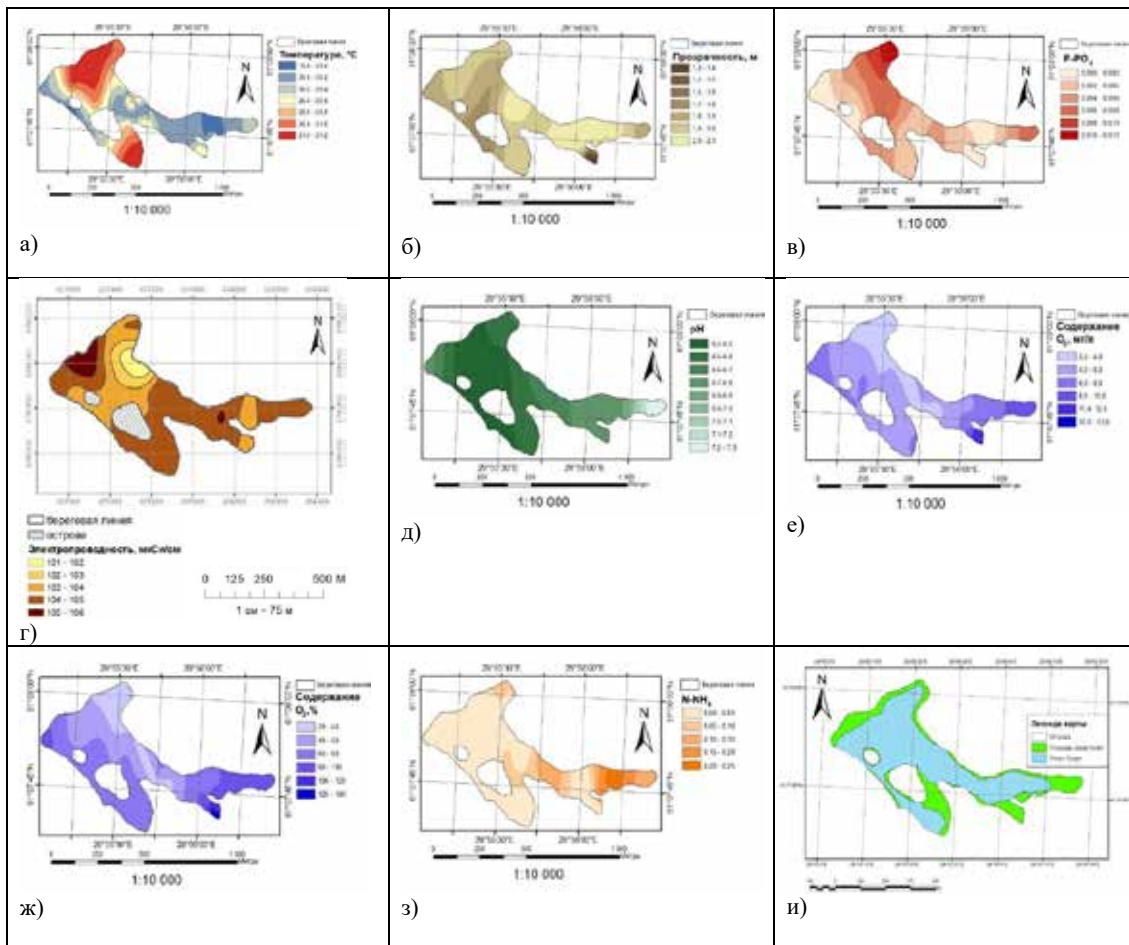


Рис. 2. Примеры результатов полевых исследований ключевого водоема в 2021 г. (оз. Суури в северо-западном Приладожье Ленинградской области):

- а) – температура воды на поверхности озера; б) – прозрачность воды по диску Секи; в) – содержание минерального фосфора на поверхности озера; г) – электропроводность воды на поверхности озера; д) – рН воды на поверхности озера; е) – содержание кислорода на поверхности озера (мг/л); ж) – содержание кислорода на поверхности озера (% насыщения); з) – содержание $N-NH_4$ на поверхности озера; и) – зарастание озера в 2021 г.

Гипотезы, подлежащие проверке при выполнении исследования

1	Интегральные оценки эмерджентных свойств и системных эффектов, выполненные на основе разных моделей-классификаций по одним исходным данным должны давать близкие результаты (модели M1 и M2 на рис.3). Модели-классификации, в которых в качестве наилучшего класса используется близость результата нормирования к «0» (M2) и модели-классификации, в которых в качестве наилучшего класса используется близость результата нормирования к «1» (M1), должны давать один класс при оценке ЭС реального водоема.
2	Учет в оценке ЭС потенциальной устойчивости на основе адапционного подхода (I тип, непроточный водоем) и регенерационного подхода (II тип, с учетом проточности) не должен приводить к разным результатам.
3	Модель-классификация оценки ЭС, построенная в предположении, что наиболее высокому статусу (I класс) должны соответствовать олиго-мезотрофные условия первичного продуцирования органического вещества в водоеме, наилучшее качество воды и наибольшая потенциальная устойчивость (принцип – «высокий статус – высокая устойчивость») (M1) и модель-классификация оценки ЭС, построенная в предположении, что наиболее высокому статусу (I класс) должны соответствовать олиго-мезотрофные условия первичного продуцирования органического вещества в водоеме, наилучшее качество воды и низкая потенциальная устойчивость (на том основании, что чистые и малопродуктивные водоемы уязвимы к загрязнению и антропогенному эвтрофированию) (M2) не должны давать противоречивые результаты.

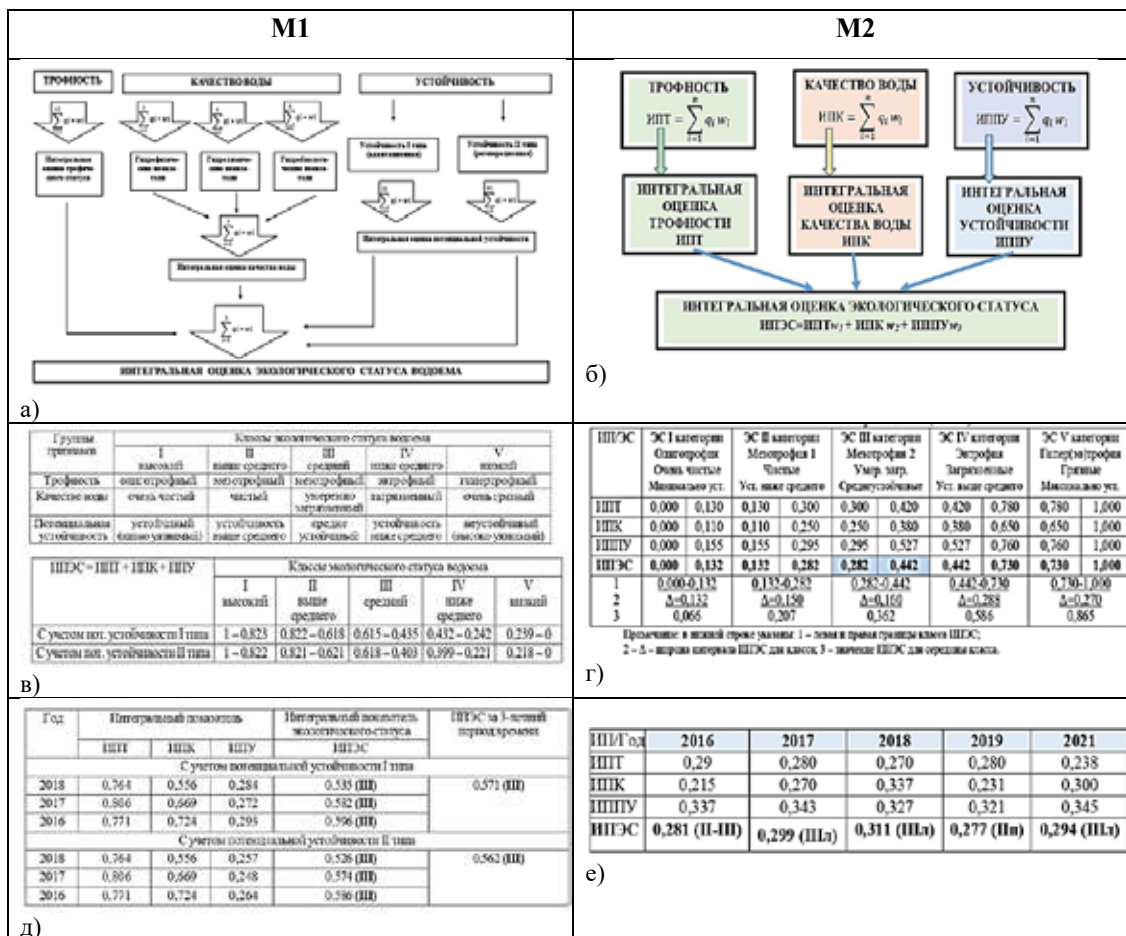


Рис. 3. Сравнение двух моделей-классификаций (M1 и M2) и результатов моделирования интегральной оценки экологического статуса (ЭС) водоема (пояснения в тексте) по [8] – а), в), д); по результатам данной статьи – б), г), е). На рисунке: а) – этапы интегральной оценки экологического статуса по [8] и б) – в данной статье; в) – классы ЭС и оценочные шкалы интегрального показателя экологического статуса (ИПЭС) для двух вариантов учета потенциальной устойчивости (I типа – адаптационная и II типа – регенерационная); г) – классы ЭС и оценочные шкалы ИПТ, ИПК, ИППУ и ИПЭС в данной статье; д) – результаты интегральной оценки ЭС на основе построения композитных индексов ИПТ, ИПК, ИППУ и ИПЭС по [8] и е) – по данной статье

Выбор метода оценки экосистемных услуг для ключевой эко/геосистемы зависит от наличия исходной информации, конкретного объекта изучения и экосистемной услуги (ЭУ) или экологической функции (ЭФ), масштаба исследования и желаемых результатов (качественная или количественная оценка). В Национальной Стратегии сохранения биоразнообразия России ЭУ/ЭФ определены как средообразующие, продукционные, информационные и духовно-эстетические [11]. Оценка ЭУ/ЭФ в отечественных публикациях чаще всего выполняется в «количественных естественнонаучных показателях» или в баллах. Наиболее распространенным методом является экономическая оценка, которая наилучшим образом

подходит для сравнения перспективы людей получить пользу от той или иной экосистемной услуги. В то же время она является весьма сложной с точки зрения выражения в монетарном виде различных функций экосистем и отсутствия спроса-предложения на определенный ресурс (услугу) в обществе.

Нами на основе натурных данных, полученных в 2021 г. выполнено сравнение факторов, определяющих биопродукционную услугу для первичного звена трофической цепи – продукции фитопланктона оз.Суури. Моделирование влияния факторов показало, что недостаток света (эффект затенения) уменьшал максимальную удельную скорость роста диатомового фитоплан-

ктонна, определяемую температурой воды, в июле в слое прозрачности воды в 1,7-1,8 раза, а зеленых водорослей в 1,5 раза. Оценка лимитации первичной продукции биогенными элементами в июле показала, что в связи с сильным прогревом водной толщи и активизацией образования первичной продукции значительно увеличилась лимитация новообразования органического вещества фосфором. Недостаток фосфора снижал в это время максимальную удельную скорость роста фитопланктона в 6-7,5 раз (в 2019 г – в 1,4 раза); недостаток азота – в 1,5-1,8 раза (в 2019 г. – в 1,2 раза).

Выполнение цели и задач исследований по созданию интегральных оценочных классификаций экологического статуса озера и исследованию биопродукционной функции ключевого водоема и факторов на них влияющих позволило получить следующие выводы:

1. Подтвердился, полученный впервые в [8], вывод о том, что при равновесном учете параметров (33) для оценки ЭС по М1 и М2 изменение типа устойчивости не повлияло на итоговый класс ЭС озера (рис. 3в и 3г). В М1 использовались два типа учета потенциальной устойчивости (слева «1», рис.3в). В М2 использовался первый тип потенциальной устойчивости (слева «0», рис.3г). Дополнительная проверка задания «0» или «1» при формировании оценочных шкал с учетом нормирующих функций, использованных в [8,9], (рис. 3в и 3г) также подтвердила, что во всех случаях озеро имеет ЭС III категории (Шл). Среднее значение ИПЭС за 5 лет по М2 составило 0,292, что соответствует Шл классу по шкале ИПЭС (3г). Изменение по годам ИПЭС за этот период по М2 не превышает 12%. Выявленные ранее различия за 3 года по М1 не превышали 10%. Тенденция на незначительный рост ИПЭС за 2016-2018, полученная в [8], далее не отмечена. Эти выводы обусловили подтверждение гипотез 1 и 2 (табл.1).

2. Модель-классификация М1 оценки ЭС [8] была построена в предположении, что наиболее высокому статусу (I класс) должны соответствовать олиго-мезотрофные условия первичного продуцирования органического вещества в водоеме, наилучшее качество воды (I класс) и наибольшая потенциальная устойчивость (I класс – устойчивый). В основу классификации был положен принцип «высокий статус – высокая устойчивость». Модель-классификация М2 оценки ЭС была построена нами в предположении, что наиболее высокому статусу (ЭС I категории) должны соответствовать олиго-мезотрофные условия

первичного продуцирования органического вещества в водоеме, наилучшее качество воды (I класс) и минимальная потенциальная устойчивость (наибольшая уязвимость) (I класс – минимально устойчивый). Эта специфика была заложена в М2 на том основании, что чистые и малопродуктивные водоемы в наибольшей степени уязвимы к загрязнению и антропогенному эвтрофированию. Сравнение рис.3д и 3е показало, что и по М1 и по М2 во все годы ИПЭС попадает в левую границу III класса по оценочным шкалам. Таким образом показано, что при разных подходах к формированию моделей-классификаций водная экосистема озера была способна в 2016-2021 гг. сохранять свой экологический статус в пределах левой границы III класса. Этот вывод обусловил подтверждение гипотезы 3 (таблица).

3. Показано, что в оценочных исследованиях ЭФ/ЭУ часто наблюдается подмена оценки ЭФ/ЭУ монетарной (немонетарной) оценкой компонентного состава эко-/геосистемы в виде оценки количества самого ресурса (вещества), существующего в системе на единицу пространства (площади) в определенный момент времени. Часто эти данные необходимы для оценки ЭФ/ЭУ, но они не должны представляться как итоги оценочных исследований ЭФ/ЭУ. Осознание того, что ЭФ/ЭУ природной системы состоят из потоков вещества (энергии, информации) от естественных основных капиталов (имеющих свою временную динамику, определяемую большим количеством факторов), которые объединяются с услугами производственного и человеческого капиталов и определяют благополучие/неблагополучие общества (выгоды, потери, формируют спрос и предложение, способствуют научно-обоснованному формированию региональной политики), приводит к необходимости изменения акцентов в сторону оценки скоростей процессов (синтеза, новообразования, трансформации, деструкции и др.) и интегративных (эмерджентных) свойств эко- и геосистем, а также факторов, влияющих на их изменение во времени. Выполнена сравнительная оценка факторов, определяющих биопродукционную услугу первичного звена трофической цепи – продукции фитопланктона оз.Суури.

Заключение

Реализованы модели-классификации интегральной оценки экологического статуса водоема. В оценке учитывалось параметрическое многокритериальное и многоуровневое сочетание продукционного потенциала системы, качества среды и потенциальной устойчивости водоема, представленное со-

ответствующими субиндексами ИПТ, ИПК, ИППУ. Построение интегральных показателей экологического статуса водоема (ИПЭС) выполнялось для равновесных условий внутри уровней (блоков) и между ними. Выполнена серия экспериментов для отработки технологии построения ИПЭС. Сформулированы и рассмотрены в исследованиях три гипотезы, имеющие определяющее значение для построения интегральных показателей экологического статуса: 1 – гипотеза о необходимости построения разных моделей-классификаций для оценки ЭС объектов исследований; 2 – гипотеза о возможности учета разных моделей устойчивости систем при оценке ЭС; 3 – гипотеза о вариантности представления оценочных шкал для субиндексов при оценке ЭС. Рассмотрены результаты интегральной оценки ЭС ключевого водоема. Показано, что в течение 5 лет оз. Суури было способно сохранить свой ЭС (III класс, ближе к левой границе класса). Выполнена сравнительная оценка факторов, определяющих биопродукционную услугу первичного звена трофической цепи – продукции фитопланктона оз. Суури.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-05-00683 А «Теоретико-методологическое обоснование, математический аппарат и модели интегральной оценки экологического статуса и экологического благополучия водных объектов».

Список литературы

1. Паспорт специальности 25.00.27 Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия. [Электронный ресурс]. URL: <https://teacode.com> > online > vak (дата обращения: 13.03.2022).
2. Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени и внесены изменения в Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденное приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. №1093. Минобрнауки России. Приказ 24 февраля 2021 г. №118. Москва. 25 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://vak.minobrnauki.gov.ru> > uploader > loader (дата обращения: 13.03.2022).
3. Дмитриев В.В., Федорова И.В., Огурцов А.Н., Седова С.А., Пленкина А. К. «Гидрология», «экология» и «геоэкология» в современных исследованиях водных объектов суши: акценты, проблемы, решения. Четвертые Виноградские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению: сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова. Санкт-Петербург, 2020. С. 12-33.
4. Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России: коллективная монография / Под ред. Н.Н. Филатова. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2019. 251 с.
5. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal L 327. 22/12/2000. 73 p.
6. Hering D., Carvalho L., Argillier C., Beklioglu M., Borja A., Cardoso A.C., et al. Managing aquatic ecosystems and water resources under multiple stress — an introduction to the MARS project. Sci. Total Environ. 2015. Vol. 503–504. P. 10–21.
7. Eugenio Molina-Navarro, Pedro Segurado, Paulo Branco, Carina Almeida, Hans E. Andersen Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks. Limnologia. 2020. № 80. P. 125742. DOI:10.1016/j.limno.2019.125742.
8. Седова С.А., Дмитриев В.В. Разработка методики интегральной оценки экологического статуса водоемов на примере малых озер северо-западного Приладожья // European Journal of Natural History. 2020. № 1. С. 37-44.
9. Седова С.А., Дмитриев В.В., Третьяков В.Ю., Глушко А.А., Пленкина А.К. Оценка воздействия на водную экосистему и ее эмерджентные свойства на основе результатов имитационного моделирования и построения композитных индексов // Успехи современного естествознания. 2021. № 6. С. 132-142.
10. Hovanov N., Hovanov K., Yudaeva M. Multicriteria estimation of probabilities on basis of expert nonnumeric, non-exact and non-complete knowledge. European Journal of Operational Research. 2009. № 195(3). P. 857-863.
11. Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 1. Услуги наземных экосистем / Ред.-сост. Е.Н. Букварева, Д.Г. Замолдчиков. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2016. 148 с.