

Васильев П.В.¹, Чистов С.В.², Криксунов Е.А.³, Бобырев А.Е.⁴

КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ РЫБ ПСКОВСКОГО ОЗЕРА

АННОТАЦИЯ

В статье авторы излагают экспериментальную методику построения серии карт численности промысловых видов рыб на основе данных их траловых учетов в акватории Псковского озера. За последние полтора десятка лет для линий траления помимо параметров ресурсного и гидролого-климатического характера стали фиксировать еще и координаты начальной и конечной точек, что создало предпосылки для разработки серии картографических моделей.

На основе специализированного ГИС-проекта выполнено картографическое моделирование пространственно-временной динамики ряда видов рыб в акватории Псковского озера за 2003, 2006 и 2008 гг., различающиеся режимом водности. В результате впервые выполнена попытка определения связей между распределением в различные сезоны года видов ихтиофауны (присутствовавших в составе улова экспериментального трала: окунь, лещ, судак, плотва, щука, ерш, густера) и градиентами гидрологических факторов (температура, водность, глубина), влияющими на поведение и перемещения рыб.

По результатам картографирования в акватории озера выявлены и оценены зоны высокой продуктивности ихтиофауны как по отдельным промысловым видам, так и по их комплексам, а также дана оценка эколого-географических параметров, определяющих акватории различной продуктивности с учетом сезонной ритмики и тенденции изменений состава улова на протяжении последних лет. Установлено, что для разных видов рыб связь плотности скоплений с гидрологическими условиями не выражена, максимальные и минимальные значения плотности для каждого из видов, в достаточном количестве присутствующих в уловах экспериментального трала, фиксируются при разных параметрах водности, температуры и глубины. Авторы предполагают, что включение в анализ других факторов (в том числе гидрохимических и гидробиологических) позволит уточнить причины, определяющие пространственно-временную динамику каждого из исследуемых видов.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения картографического метода в изучении пространственно-временных особенностей формирования биопродуктивности экосистем внутренних водоемов. Дополнительное привлечение данных натурных измерений, мониторинговых наблюдений и аэрокосмических исследований (как дополнительных источников информации о состоянии водной среды) позволит существенно расширить возможности комплексного изучения динамических режимов как отдельных компонентов экосистемы водоема, так и биотического сообщества в целом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: картография, моделирование, динамика популяций, рыбы, Псковское озеро.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: yadrpaul1993@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: svchistov@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: kriksunov@mail.ru

⁴ Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова, Ленинский проспект, д. 33, 119071, Москва, Россия, *e-mail*: abobyrev@mail.ru

Pavel V. Vasilev¹, Sergey V. Chistov², Evgeniy A. Kriksunov³, Alexander E. Bobyrev⁴

CARTOGRAPHIC MODELING OF SPATIAL-TEMPORAL DYNAMICS OF FISH POPULATIONS FROM PSKOV LAKE

ABSTRACT

An experimental methodology is designed for map series construction where maps represent the abundance of commercial fish species in Pskov Lake estimated using data from trawl surveys. Over the last 15 years, for each survey (which are usually conducted in the first or the second half of vegetation season), vessel coordinates at the starting and ending points of linear trawling transects are registered as a vessel tows a trawl with given velocity.

Cartographic modeling of spatial-temporal dynamics of several fish species from Pskov Lake has been conducted on the basis of the specialized GIS-project. Considered are 2003, 2006, and 2008 years, which differ in water discharge level. Given the resulting data, an attempt has been made to reveal the relationships between fish spatial distribution (of those species present in experimental trawl catch: perch, bream, zander, roach, pike, ruff, and white bream) and gradients of those factors influencing their behavior and movements (temperature, water level, depth). The estimates of fish population density in different lake zones are obtained, and the size of areas with different density of fish aggregations is calculated. For instance, in 2003 (which is characterized by medium water discharge level) fish aggregations of high density occupied an area of 28.57 km², in 2006 (low water discharge) – only 12.46 km², while in 2008 (high water discharge) – 56.41 km². In addition, the contingency in spatial distribution of fish species connected by "predator-prey" relations is analyzed.

By the results of approbation of the mapping technique developed, the following patterns are revealed in forming of water areas with high fish density: 1. In high-water years, the density of fish aggregations increase as well as the total area occupied by them. In such years, aggregations are formed in the central part of the lake. In low-water years they shift towards coastal areas including river mouths and deltas. 2. In Pskov Lake, the predominant depth of those areas occupied by fish aggregations is about 4.1–4.6 m. With water level increasing, dense aggregations move to areas of greater depth. 3. Fish aggregations predominantly form on those areas where surface water temperature is approximately equal to or lower than mean overall value.

For some fish species, the relationships between aggregations density and hydrological conditions are not detectable, probably because of few hydrological or hydrochemical traits included in the analysis. It is to be expected that introducing more data of monitoring observations along with data from remote sensing (as additional source of information on aquatic conditions) would significantly expand the possibilities for complex studies of dynamic regimes of separate ecosystem components as well as the lake biotic community as a whole.

KEYWORDS: cartography, modeling, population dynamics, fish, Pskov Lake.

ВВЕДЕНИЕ

Псковско-Чудское озеро, расположенное на границе между Эстонией и Россией, относится к наиболее продуктивным внутренним водоемам северной Европы. В целом озеро представляет собой систему из трех связанных между собой озер: Чудского,

¹ Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* yadrpaul1993@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* svchistov@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia, *e-mail:* kriksunov@mail.ru

⁴ A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, 33 Leninskij prosp., 119071, Moscow, Russia, *e-mail:* abobyrev@mail.ru

Псковского и Теплового. Их общая площадь составляет 3555 км², средняя глубина – 7,1 м, наибольшая – 15,3 м [Nögesetal, 1996].

В составе ихтиофауны Псковско-Чудского озера насчитывается 36 видов рыб [Lammensetal, 2007], из которых 23 имеют промысловое значение [Nögesetal, 1996]. К массовым и наиболее значимым в промысловом и экологическом отношении видам относятся снеток, лещ, окунь, судак, плотва, ряпушка, сиг и др.

Рыбохозяйственные и экологические исследования Псковско-Чудского водоема имеют длительную историю [Kanguretal, 2001]. К настоящему времени накоплены значительные объемы данных, используемые в модельном анализе особенностей промышленной эксплуатации отдельных наиболее важных видов биоресурсов, а также для интерпретации общих свойств биотического сообщества озера, процессов формирования его биологической продукции и той ее части, которая вовлекается в хозяйственный оборот [Bobyrevetal, 2013].

Используемые при этом подходы отличает то общее свойство, что моделируемые системы, будь то отдельные популяции или биотическое сообщество водоема в целом, рассматриваются как точечные объекты. Их исчерпывающими характеристиками являются усредненные показатели обилия, массы организмов, их темпов роста и отмирания или усредненные оценки удельного потребления, продукции, состава пищевых рационов и др. За рамками рассмотрения остается фактор пространства, который играет важную роль в динамике биотических взаимоотношений организмов или их отношений с абиотическими компонентами среды обитания. Очевидно, что при одной и той же средней концентрации локальные плотности рыб могут существенно различаться, внося искажения в рассчитанные для средних уровней результаты межвидовых взаимодействий, популяционные или экосистемные изменения.

Пространственная и экологическая неоднородность – характерная особенность организации экосистемы Псковско-Чудского озера. Она проистекает из особенностей его географического положения, морфометрии, особенностей питания и т. д. С севера на юг озеро протянулось примерно на 135 км, с запада на восток – около 50 км в самом широком месте. При этом три части озера, Псковское, Теплое и Чудское, отделены друг от друга узкими проливами (пролив между Теплым и Псковским – около 4 км, между Теплым и Чудским – 1,75 км), что определяет своеобразие условий в каждом из этих озер.

В последние годы в связи с развитием геоинформационных систем произошли важные изменения в применении методологии пространственного анализа для фаунистических данных. В случае рыбных ресурсов учет фактора пространства может иметь большое значение, в том числе для целей управления промыслом. Не случайно, что все большее число национальных и международных экспериментальных исследований, охватывающих важные промысловые районы, проводятся с помощью включения геоинформационных подходов в общие модели теории рыболовства, интерпретирующие изменения запасов под действием промысла [Relini, 1985; Ardizzone, 1994; Relini, Piccinetti, 1994; Corsi, 2000; Steenbeeketal, 2013].

Настоящая работа посвящена изучению пространственно-временной динамики рыб Псковского озера. Исследование носит подготовительный и во многом методический характер. Оно направлено на выявление характерных черт в картине пространственного распределения различных видов рыб в разные сезоны вегетационного периода. Его конечной целью является разработка общей модели популяционных изменений рыб и динамики биотического сообщества Псковско-Чудского озера, включающей пространственное измерение.

Внимание к ихтиологическим объектам в данной работе определяется тем, что из всех видов гидробионтов рыбы являются объектами, максимально обеспеченными информацией, полученной из анализа результатов промыслово-биологического мониторинга, используемой в расчетах демографических параметров и популяционных процессов. Данные о сезонных перемещениях рыб крупных озер фрагментарны. Большой частью они относятся к периодам образования преднерестовых и нерестовых скоплений в районах, где исторически размещаются основные виды промысла. Полные знания о картинах пространственного распределения различных видов рыб в озерных экосистемах и факторах, их контролирующих, практически отсутствуют.

Псковское отделение Государственного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства им. Л.С. Берга (ГосНИОРХ) с 1999 г. проводит траловые учеты рыб в акваториях Псковского и Чудского озер. Результаты таких учетов, проводимых в начале вегетационного периода и второй его половине, использованы в качестве исходных данных настоящей работы. Их анализ требует привлечения современных подходов, основанных на использовании методов, способных оперировать множеством переменных. К таким методам относятся, в частности, геоинформационные технологии и математико-картографическое моделирование. Авторы считают, что реализация таких подходов существенно повысит эффективность анализа накопленных к настоящему времени данных, даст объективную картину особенностей распределения рыб в разные сезоны года, позволит определить главные факторы пространственно-временной динамики отдельных видов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Базисом для информационного обеспечения работ послужили данные многолетних натурных обследований продуктивности промысловых видов рыб Псковско-Чудского озерного комплекса методом траления. Работы выполнены Псковским отделением ГосНИОРХ, сотрудники которого предоставили материалы статистики.

Для отработки методики авторами были собраны и структурированы данные статистики за период 1999–2011 гг., относящейся к главным промысловым видам рыб. Исследованы семь основных представителей ихтиофауны, представляющих наибольший интерес в плане изучения особенностей их пространственно-временного распределения: окунь, лещ, судак, плотва, щука, ерш и густера.

Эти виды можно подразделить на категории хищников и «жертв» по преобладающему типу питания. Ведущими преимущественно хищнический образ жизни видами являются окунь, судак и щука. Питающимися, в основном, фито- и зоопланктоном, мелкими ракообразными и моллюсками и выступающими чаще всего в качестве «жертв» (объектов питания хищников) видами являются лещ, густера, плотва и ерш.

Исходные данные траловых съемок в общем случае включают следующую информацию:

- 1) номер (обозначение) траления;
- 2) координаты начальной и конечной точек траления;
- 3) дата и время начала и окончания траления;
- 4) скорость траления;
- 5) температура воды во время траления;
- 6) вылов по отдельным видам рыб и размерам (длине) экземпляров;
- 7) примечания.

Особенно важным является наличие у данных тралового учета позиционной составляющей – координат начальной и конечной точек траления, что позволяет исследовать пространственно-временные особенности формирования продукции промысловых видов рыб и биопродуктивности озера в отдельных его акваториях.

Для выбранного массива данных была проведена классификация с учетом степени подробности и структурированности исходной информации, как для всего массива отмеченных лет, так и для сезонов траления. В результате по степени информативности траловых съемок были выделены три класса лет, для которых характерны:

- 1) высокая информативность – результаты содержат данные по 5 и более видам, в том числе по 2 и более «жертвам»;
- 2) средняя информативность – результаты содержат данные по 4, в том числе 1 «жертве»;
- 3) низкая информативность – результаты содержат данные по 3 и менее видам без «жертв».

Были выделены три года с высокой информативностью как минимум за два сезона (I – весна/начало лета; II – осень): 2003, 2006 и 2008 гг. Эти данные послужили основой для отработки методики картографирования пространственно-временного распределения основных промысловых видов рыб на основе специально созданного ГИС-проекта.

Известно, что разные виды промысловых рыб имеют специфические требования к условиям обитания по сезонам года. В этом отношении возникла необходимость изучения гидролого-климатических особенностей не только водоема, но и бассейна р. Великой, в котором преимущественно формируется водный режим всей Псковско-Чудской системы проточных озер. Поэтому в исследовании помимо статистики о биопродуктивности озера были собраны данные о некоторых гидролого-климатических факторах, влияющих на демографические популяционные параметры массовых видов рыб водоема.

Ниже всего по течению из всех действующих на р. Великой гидрологических постов, а значит, и наиболее близко к самому Псковскому озеру расположен пункт наблюдений в г. Пскове. Из всех гидрологических характеристик, фиксируемых на этом посту, с величиной расхода взвешенных наносов, который играет значительную роль в формировании биопродуктивности озерных экосистем, более всего связан уровень воды. По взятым из «Информационной системы по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России» [Информационная система..., 2014] исходным данным были составлены графики хода уровня воды в р. Великой в створе гидрологического поста г. Пскова относительно нуля графика поста для 2003, 2006 и 2008 гг.

На основе сравнительного анализа полученных графиков эти годы с высокой информативностью траловых учетов были разделены по относительной водности: 2003 – средневодный, 2006 – маловодный, 2008 – многоводный год. Материалы шести траловых съемок, проведенных в эти годы (по две съемки в год), были использованы в качестве модельных (эталонных), для которых отработывалась единая методика картографического моделирования. Подробная технологическая схема методики и ее описание изложены авторами ранее [Васильев, Чистов, 2017], а на рис. 1 приведена обобщенная схема основных этапов работ.

На первом этапе выполнялась предварительная обработка данных: структурирование, формализация, перевод в цифровой векторный формат (в частности, построение по координатам начальных и конечных точек самих линий траления и выделение средних точек этих линий как исходных для последующей интерполяции) и выделение границ исследуемой акватории.

С целью выбора из наиболее распространенных в ГИС-пакетах методов интерполяции наиболее приемлемого не только с математической, но и с географической точки зрения было проведено пробное моделирование. В качестве тестовых были взяты данные по вылову плотвы в ходе траловой съемки, проводившейся на Псковском озере 25–26 октября 2008 г. На основе этих данных разными методами было построено пять моделей (рис. 2) пространственного распределения продуктивности этого вида в акватории озера. Тестировались следующие методы интерполяции:

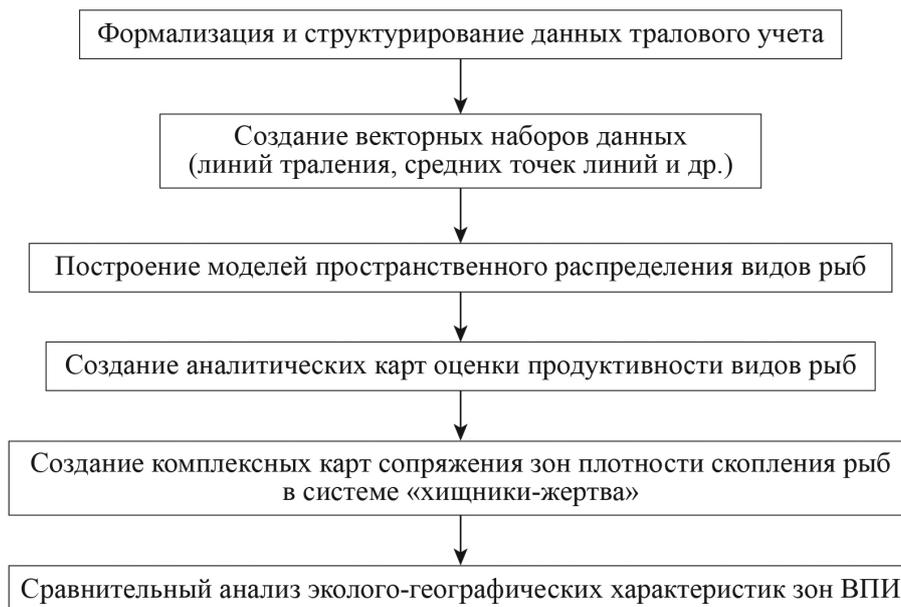


Рис. 1. Схема методики картографического моделирования пространственно-временной динамики популяций рыб
Fig. 1. Scheme of methods for cartographic modeling of spatial-temporal dynamics of fish populations

- 1) метод обратно взвешенных расстояний (ОВР) (рис. 2, а);
- 2) метод естественной окрестности (рис. 2, б);
- 3) метод полиномиального тренда 2-й степени (рис. 2, в);
- 4) метод полиномиального тренда 3-й степени (рис. 2, г);
- 5) метод сплайнов с натяжением (рис. 2, д).

Как видно из рис. 2, наиболее правдоподобным, достоверным, соответствующим традиционным для географии и картографии представлениям о плавном и непрерывном рисунке изолиний как реальных, так и абстрактных геополей является результат моделирования, полученный с использованием метода сплайнов с натяжением (рис. 2, д). В связи с этим именно он был выбран в качестве метода интерполяции исходных данных в рамках настоящей методики.

Далее осуществлялось построение моделей пространственного распределения каждого из семи видов рыб в периоды проведения соответствующих траловых съемок посредством интерполяции по выбранному методу. Затем была проведена классификация полученных растровых моделей по методу равных интервалов (для показателя плотности скопления) и по методу квантилей (для выделения зон с высокой, средней и низкой плотностью). В результате было составлено 38 аналитических карт оценки продуктивности видов рыб. Примеры таких карт для продуктивности судака (хищника) и плотвы («жертвы») в мае 2003 г. представлены на рис. 3.

На основе полученных аналитических карт посредством графического и топологического оверлея затем составлялись комплексные карты сопряжения (соответствия в пространстве) зон плотности скопления рыб в системе «хищники – жертва». Для картографирования были выбраны наиболее типичные представители этих звеньев трофической сети среди основных видов рыб, обитающих в Псковском озере: окунь, судак и щука – как хищники, плотва – как «жертва». Всего составлено шесть комплексных карт. Пример одной из этих карт приведен на рис. 4.

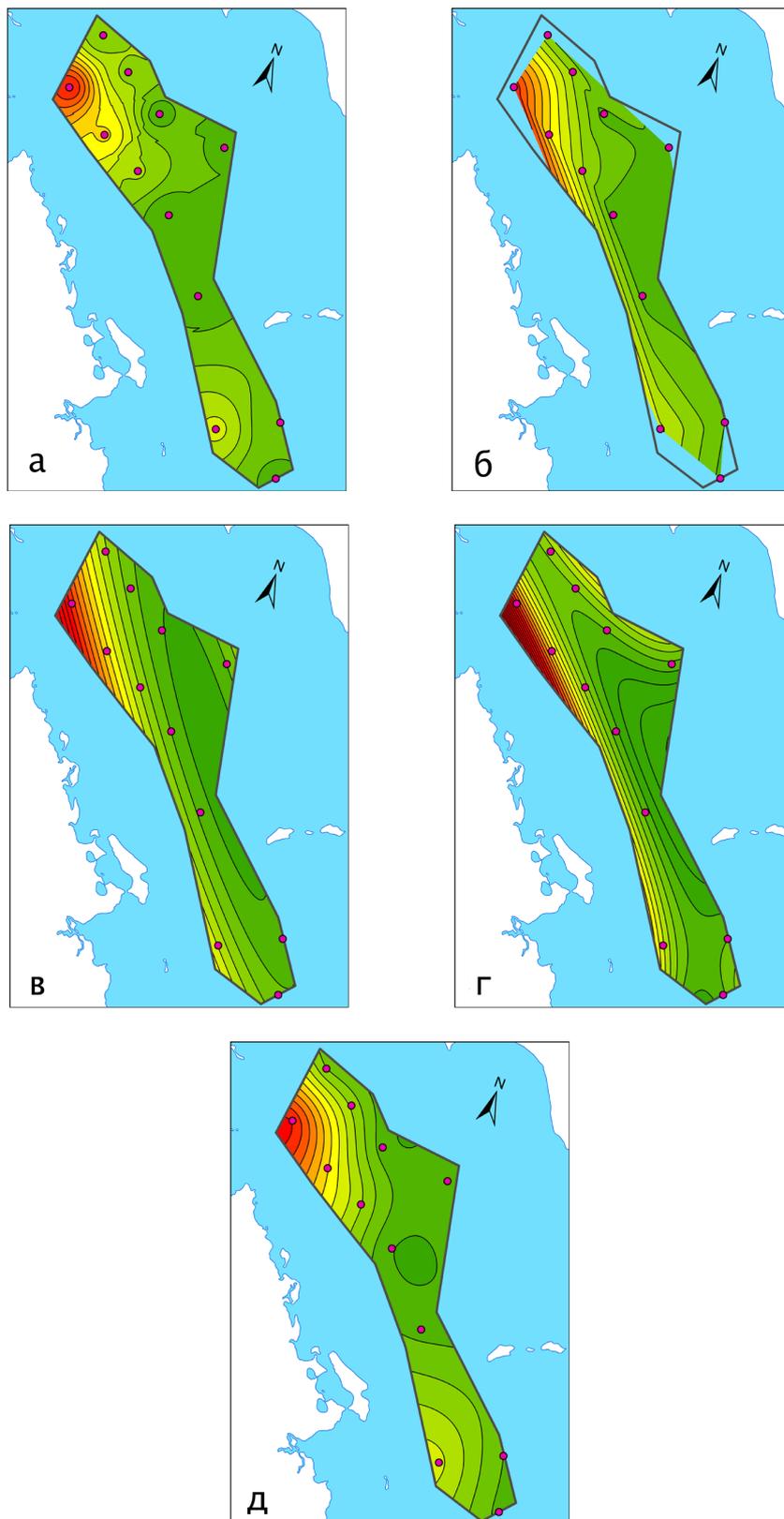


Рис. 2. Сравнение результатов тестирования методов интерполяции
(пунксами показаны исходные точки для моделирования)
Fig. 2. Comparison of the results of testing interpolation methods
(initial points for modeling are shown by markers)

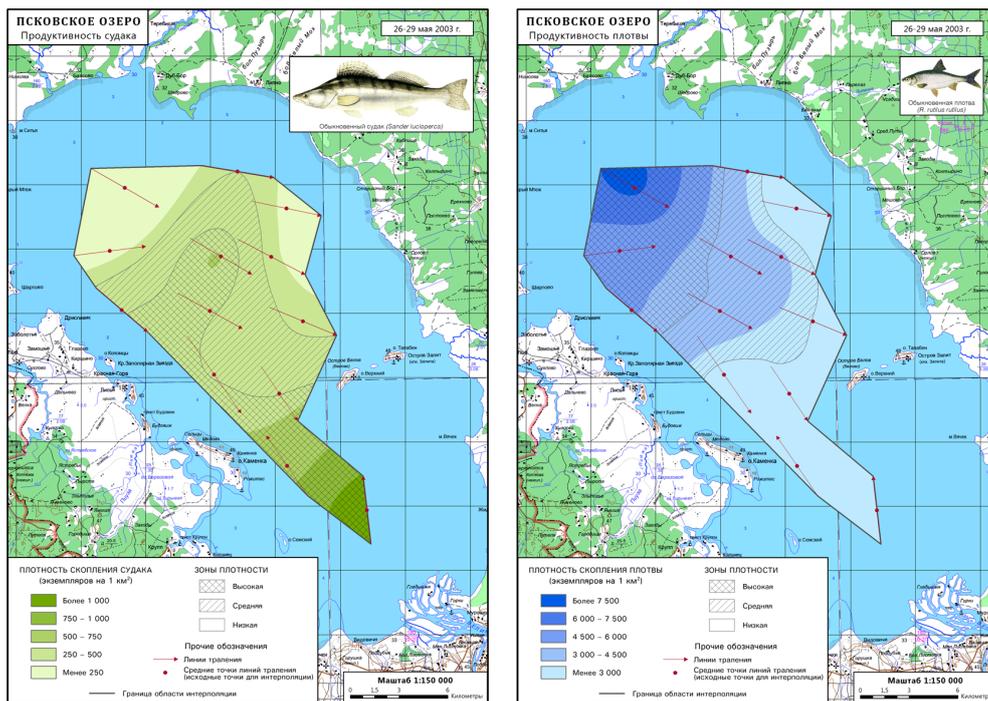


Рис. 3. Примеры аналитических карт оценки продуктивности видов рыб
Fig. 3. Examples of analytical maps with assessment the productivity of fish species

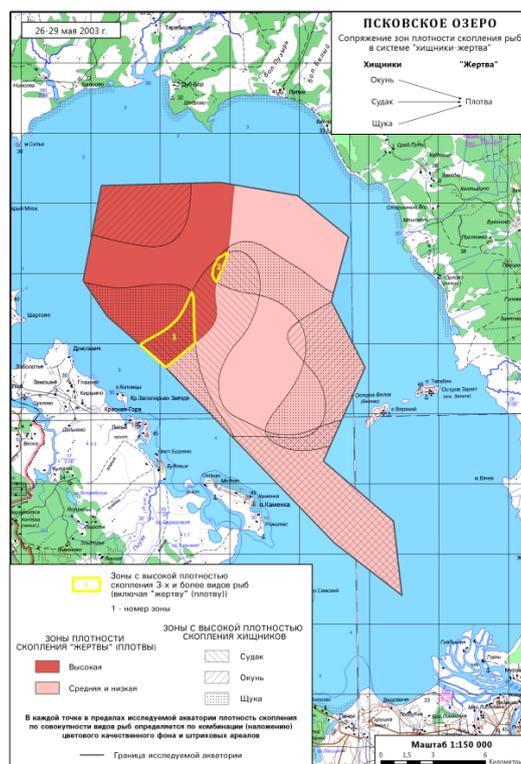


Рис. 4. Пример комплексной карты сопряжения зон плотности скопления рыб в системе «хищники – жертва»
Fig. 4. Example of complex map with spatial match of fish density zones in the "predators-prey" system

По результатам комплексного картографирования были также отдельно выделены зоны с высокой плотностью скопления трех и более видов рыб, включая «жертву» – плотву, как участки, потенциально обладающие наиболее благоприятными условиями для высокой продуктивности ихтиофауны (ВПИ). В общей сложности было выявлено восемь таких зон в периоды проведения траловых съемок.

На заключительном этапе проводился сравнительный анализ выявленных зон ВПИ по совокупности следующих эколого-географических характеристик:

- 1) местоположение зоны в акватории озера;
- 2) плотность скопления видов рыб (хищников и «жертвы»);
- 3) характеристика эталонного года по степени водности (маловодный, средневодный или многоводный);
- 4) уровень воды в период проведения траловой съемки на постах: о. Залита (Псковское озеро) и г. Псков (р. Великая);
- 5) температура воды у поверхности;
- 6) глубина;
- 7) площадь зоны, а также суммарная площадь зон за период проведения траловой съемки и суммарная площадь выявленных зон за эталонный год.

В результате анализа были выявлены важные особенности в формировании зон с высокой продуктивностью ихтиофауны, связанные, прежде всего, с гидрологическими условиями.

Авторами также проводились эксперименты по повышению географической и картографической достоверности моделирования пространственного распределения видов рыб. В частности, была разработана методика построения границы области интерполяции на основе статистического анализа распределения глубин.

Глубина является одним из ключевых факторов, определяющих условия обитания водного населения и, в частности, ихтиофауны в водоемах [Методика..., 1975]. В связи с этим границей области интерполяции вполне обоснованно могут служить линии равных глубин – изобаты.

На первом этапе методики строится предварительная растровая модель пространственного распределения одного из видов рыб, учтенных в траловой съемке. Областью интерполяции при этом служит полигон, образуемый начальными и конечными точками линий траления, соединенными отрезками прямых линий (в топографической проекции) по принципу, аналогичному методу построения выпуклой оболочки.

Далее для каждой ячейки растра полученной модели определяется соответствующая ее плановому положению глубина по имеющейся цифровой модели рельефа (ЦМР) дна озера. Для результирующего массива значений глубин затем проводится статистический анализ на основе методики, предложенной Ю.Г. Симоновым [Симонов, 1998]:

1. Ранжированный в порядке возрастания исходный ряд значений глубин разбивается на разряды, соответствующие интервалу глубин в 0,1 м.
2. Вычисляются общие характеристики для всего массива значений: среднее арифметическое, среднее квадратическое отклонение, их ошибки и коэффициент вариации.
3. Вычисляются статистические показатели для каждого разряда: центр, частота встречаемости значений, вероятность и др.
4. Строятся гистограмма и график кривой функции распределения.
5. Определяется величина, «отсекающая» разряды минимальных значений глубин по критерию 95–98 % вероятности, исходя из полученных статистических показателей, гистограммы и графика.

Найденное значение, таким образом, является нижней границей интервала наиболее часто встречающихся глубин в пределах общей области проведения данной траловой съемки. Иными

словами, изобаты, соответствующие этой глубине, ограничивают ту часть акватории, к которой может быть отнесен основной массив результатов траловой съемки. Следовательно, эти изобаты могут служить границей области интерполяции при моделировании пространственного распределения видов рыб уже с учетом соблюдения его географической достоверности.

Искомые изобаты сначала строятся по ЦМР дна, а затем для целей картографирования и последующих анализа и оценки модифицируются: короткие – исключаются, угловатые участки – сглаживаются.

Полученный набор полигонов с границами из модифицированных изобат является целевой областью интерполяции, в пределах которой в дальнейшем возможно построение итоговых географически и картографически достоверных моделей пространственного распределения видов рыб.

На рис. 5 в качестве примера представлена карта оценки продуктивности судака в Псковском озере по данным траловой съемки, проводившейся в мае 2003 г.



Рис. 5. Пример карты оценки продуктивности судака, составленной с использованием в качестве границы области интерполяции контура, полученного на основе статистического анализа распределения глубин
Fig. 5. Example of map with assessment of zander productivity, made by using boundary obtained from statistical analysis of depth distribution as the interpolation area contour

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе особенностей пространственно-временной динамики рыб учитывалось два основных гидрологических параметра – глубина и температура воды у поверхности. Для более точного и достоверного определения глубин в пределах выявленных зон скоплений рыб построена ЦМР дна всего Псковско-Чудского озерного комплекса и составлены соответствующие карты. Определение температуры воды в периоды проведения траловых съемок осуществлялось в несколько этапов. Сначала по средним точкам линий траления выполнялось построение моделей распределения температуры, измеряемой в ходе съемок и представленной в траловых журналах. Затем по тому же принципу, что и в случае с плотностью скопления видов рыб, по полученным растровым моделям рассчитывалась зональная статистика.

Анализ комплексных карт, учитывающих пространственные сопряжения зон в распределении видов рыб, относящихся к хищным (судак, окунь, щука) и мирным (плотва) рыбам, карт температуры воды и рельефа дна дает следующие результаты.

В 2003 г., который был определен как год с относительно средней водностью среди эталонных лет, в периоды проведения траловых съемок формировалось три зоны плотных скоплений рыб, представленных одновременно хищными и мирными видами: две – № 1 и 2 – с 26 по 29 мая и одна – № 3 – с 28 по 30 октября.

Зона № 1, большая из двух по площади (5,55 км²), находилась ближе к западному берегу озера на участке с глубинами от 4,5 до 4,8 м и температурой воды у поверхности от 16,5 до 16,7 °С (в среднем 16,6 °С). Зона № 2 располагалась в центре озера к северо-востоку от 1-й на участке с глубинами от 4,5 до 4,7 м (в среднем 4,6 м) и температурой воды у поверхности на тот период 16,7 °С.

Зона высокой плотности, отмеченная для периода 28–30 октября 2003 г., имела площадь 22,4 км² и находилась в крайней северо-западной части исследуемой акватории, ближе к проливу, соединяющему Псковское озеро с Теплым. Средние значения плотности рыб в этой зоне составляли: для судака – 2010 экз./км², окуня – 2464 экз./км², щуки – 800 экз./км² (наибольшая среди выявленных зон), плотвы – 2575 экз./км². Глубина в пределах зоны менялась в диапазоне от 1,9 до 5 м, в среднем составляя 4,1 м. Температура воды в ходе траловой съемки 28–30 октября 2003 г. не измерялась. В целом общая площадь выявленных за средневодный 2003 г. зон с высокой плотностью скопления рыб равна 28,57 км².

В 2006 г. (малой водности) формировалась лишь одна зона высокой плотности рыб, приходящаяся на период 21–24 августа. Она располагалась в крайней юго-восточной части озера, на расстоянии немногим более 3 км от авандельты р. Великой, и имела площадь 12,46 км². Средние значения плотности отдельных видов составляли: для судака – 2493 экз./км², окуня – 4382 экз./км², щуки – 166 экз./км², плотвы – 7347 экз./км². Глубины на этом участке варьировали от 3,8 до 4,3 м (в среднем 4,1 м), температура воды у поверхности – от 20,1 до 20,4 °С (в среднем 20,2 °С). Площадь единственной выявленной за маловодный 2006 г. зоны скопления рыб составила 12,46 км².

В 2008 г. (среди эталонных год с относительно большой водностью) зарегистрировано сразу четыре зоны высокой плотности рыб: № 1 – с 9 по 11 июня и № 2, 3 и 4 – с 25 по 26 октября.

Обширная, вытянутая с севера на юг зона № 1 фиксировалась в центральной части акватории озера между островами Каменка и Верхний. Она имела максимальную среди всех площадь – 24,95 км². В этом скоплении доминировали три вида рыб: судак (в среднем 1632 экз./км²), окунь (3441 экз./км²) и плотва (11 033 экз./км²). Зона располагалась на участке с глубинами от 4,4 до 4,8 м (в среднем 4,6 м), с температурами воды у поверхности 17,5–17,7 °С (в среднем 17,6 °С).

Три зоны с высокой плотностью скопления рыб (№ 2, 3 и 4), сформировавшиеся в период проведения траловой съемки 25–26 октября 2008 г., в совокупности имели площадь 31,46 км². Первые две (№ 2, 3) располагались в северо-западной части исследуемой акватории на расстоянии 500–600 м друг от друга, но при этом различались по соотношению и составу видов. Площадь зоны № 1, находившейся северо-западнее зоны № 2, составила 3,05 км². Площадь зоны № 2 – 22,05 км²; состав и обилие зарегистрированных здесь видов следующие: судак – 1250 экз./км², окунь – 5892 экз./км², щука – 229 экз./км², плотва – 84021 экз./км². Обе зоны располагались на участках с глубинами от 3,6 до 5 м (в среднем 4,1 м) и температурой воды у поверхности на тот период от 7,64 до 7,9 °С (в среднем 7,7 °С). Зона № 3 находилась в юго-восточной части исследуемого участка акватории и имела площадь 6,36 км². В ее пределах отмечалась высокая плотность окуня, щуки и плотвы, судак отсутствовал. Глубины этой зоны варьировали от 4,2 до 4,5 м (в среднем 4,3 м) и температура воды у поверхности – от 7,6 до 7,8 °С (в среднем 7,7 °С). В целом суммарная площадь выявленных за многоводный 2008 г. зон с высокой плотностью скопления рыб составляет 56,41 км², что является наибольшим значением для выбранных эталонных лет.

К сожалению, использование ограниченного числа переменных, характеризующих условия гидрологического режима на отдельных участках акватории Псковского озера, не позволяет выделить связь между показателями среды и процессами формирования скоплений рыб разного вида. Максимальные и минимальные значения плотности для четырех рассматриваемых видов регистрируются при совершенно разных параметрах водности, температуры и глубины, что, впрочем, не удивительно, если учитывать сложные механизмы поведения рыб и множество факторов, оказывающих влияние на динамику их популяций. Тем не менее нам представляется, что геоинформационные методы являются одним из немногих инструментов, способных эффективно решать биоэкологические задачи по анализу связи между организмами и распределенными в пространстве элементами, процессами и явлениями. Одним из условий этого представляется наличие необходимой статистики, позволяющей вовлекать в анализ различные показатели, отражающие не только гидрологические, но и гидрохимические, экологические и биологические особенности, влияющие на поведение и перемещения рыб.

ВЫВОДЫ

По итогам апробации разработанной методики для выбранных эталонных лет выявлены следующие особенности в формировании зон высокой плотности рыб:

1. В многоводные годы суммарная площадь зон скопления рыб и плотность этих скоплений возрастают. В эти годы зоны скопления формируются в центральной части Псковского озера. В маловодные годы они смещаются к береговым участкам, в том числе к устьям и дельтам впадающих в озеро рек.

2. В акватории Псковского озера преобладающие глубины в зонах скопления рыб составляют 4,1–4,6 м. При повышении уровней воды (по сравнению с характерными в рассматриваемый год величинами) зоны скопления смещаются на участки с большими глубинами. Эта закономерность сохраняется даже при приведении глубин к среднему многолетнему межennale уровню воды в озере.

3. Формирование скопления рыб происходит преимущественно на участках с температурой воды у поверхности, соответствующей средним и ниже среднего значениям по акватории.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-04-00892.

Авторы выражают благодарность за содействие и помощь в исследовании руководству и специалистам Псковского отделения ГосНИОРХ: директору к.б.н. М.М. Мельник и старшему научному сотруднику, к.б.н. С.О. Северину. Авторы также признательны научному сотруднику географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.г.н. Д.Н. Айбулатову за предоставленные данные гидрологических наблюдений на р. Великой.

ACKNOWLEDGEMENTS

The reported study was funded by RFBR according to the research project No 17-04-00892.

Authors are grateful to management and specialists of the Pskov branch of GosNIORH for assistance in the research: to Director, Candidate of Biological Sciences M.M. Mel'nik and to Senior Researcher, Candidate of Biological Sciences S.O. Severin. Authors are also grateful to Researcher of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University, Candidate of Geographical Sciences D.N. Aibulatov for provided hydrological observations on the Velikaya River.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев П.В., Чистов С.В.* Картографирование биопродуктивности Псковского озера // Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова / Ред. М.В. Зимин, П.Е. Каргашин, М.В. Кусильман и др. М.: КДУ, 2017. С. 14–24.
2. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России // Информационно-аналитический центр регистра и кадастра РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. – Режим доступа: <http://gis.vodinfo.ru/>. Дата обращения: 30.03.2018.
3. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.
4. *Симонов Ю.Г.* Морфометрический анализ рельефа. М.; Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. 272 с.
5. *Ardizzone G.D.* An attempt at a global approach for regulating the fishing effort in Italy SIBM 1994 // *Biol. Mar. Medit.* 1994. V. 1, N 2. P. 109–113.
6. *Bobyrev A.E., Kriksunov E.A., Murzov N.N. et al.* Stock status and current tendencies in the population dynamics of commercial fishes of Pskov-Chudskoe water body // *J. Ichthyology.* 2013. V. 53, N 1. P. 28–40. DOI: 10.1134/S0032945213010037.
7. *Corsi F.* Geographical Information Systems and Surplus Production Models: a new model for spatial assessment of demersal resources // *Towards the Use of Geographic Information Systems as a Decision Support Tool for the Management of Mediterranean Fisheries* / M. Taconet and A. Bensch (Eds.). *Informes y Estudios COPEMED.* 2000. V. 4. P. 1–6.
8. *Kangur K., Haberman J., Kangur A. et al.* History of investigations on the ecosystem of Lake Peipsi // *Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol.* 2001. V. 50, N 3. P. 169–179.
9. *Lammens E., Kangur A., Kangur P., Melnik M.* Fish stock and fishery // *In the mirror of a Lake Peipsi and Ijsselmeer for mutual reference* / Eds. Eerden M. van et al. Lelystad: Rijkswaterstaat, 2007. P. 113–121.
10. *Nõges T., Haberman J., Jaani A. et al.* General description of Lake Peipsi-Pihkva // *Hydrobiologia.* 1996. V. 338. P. 1–9. DOI: 10.1007/BF00031706.
11. *Relini G.* Programme of the Italian Ministry of the Merchant Marine for the Demersal resources in the Area 37/3 // *FAO Fish. Rep.* 336. 1985. P. 119–123.

12. *Relini G., Piccinetti C.* Ten years of trawl surveys in the Italian Seas (1985–1995) // *FAO Fish. Rep.* 533 (Suppl.). 1994. P. 21–41.
13. *Steenbeek J., Coll M., Gurney L. et al.* Bridging the gap between ecosystem modeling tools and geographic information systems: Driving a food web model with external spatial–temporal data // *Ecological Modelling.* 2013. V. 263. P. 139–151. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2013.04.027.

REFERENCES

1. *Ardizzone G.D.* An attempt at a global approach for regulating the fishing effort in Italy SIBM 1994. *Biol. Mar. Medit.* 1994. V. 1, No 2. P. 109–113.
2. *Bobyrev A.E., Kriksunov E.A., Murzov N.N. et al.* Stock status and current tendencies in the population dynamics of commercial fishes of Pskov-Chudskoe water body. *J. Ichthyology.* 2013. V. 53, No 1. P. 28–40. DOI: 10.1134/S0032945213010037.
3. *Corsi F.* Geographical Information Systems and Surplus Production Models: a new model for spatial assessment of demersal resources. Towards the Use of Geographic Information Systems as a Decision Support Tool for the Management of Mediterranean Fisheries. M. Taconet and A. Bensch (Eds.). *Informes y Estudios COPEMED.* 2000. V. 4. P. 1–6.
4. Information system on water resources and water management of Russian river basins. Informational and Analytical Center of the Register and Cadaster, Russian Timiryazev State Agrarian University. Web resource: <http://gis.vodinfo.ru/>, accessed 30.03.2018 (in Russian).
5. *Kangur K., Haberman J., Kangur A. et al.* History of investigations on the ecosystem of Lake Peipsi. *Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol.* 2001. V. 50, No 3. P. 169–179.
6. *Lammens E., Kangur A., Kangur P., Melnik M.* Fish stock and fishery. In the mirror of a Lake Peipsi and IJsselmeer for mutual reference. Eds. Eerden M. van et al. Lelystad: Rijkswaterstaat, 2007. P. 113–121.
7. Methods of studying biogeocenoses of inland water bodies. M.: Nauka, 1975. 240 p. (in Russian).
8. *Nõges T., Haberman J., Jaani A. et al.* General description of Lake Peipsi-Pihkva. *Hydrobiologia.* 1996. V. 338. P. 1–9. DOI: 10.1007/BF00031706.
9. *Relini G.* Programme of the Italian Ministry of the Merchant Marine for the Demersal resources in the Area 37/3. *FAO Fish. Rep.* 336. 1985. P. 119–123.
10. *Relini G., Piccinetti C.* Ten years of trawl surveys in the Italian Seas (1985–1995). *FAO Fish. Rep.* 533 (Suppl.). 1994. P. 21–41.
11. *Simonov Yu. G.* Morphometric analysis of relief. M.; Smolensk: Izd-vo SGU, 1998. 272 p. (in Russian).
12. *Steenbeek J., Coll M., Gurney L. et al.* Bridging the gap between ecosystem modeling tools and geographic information systems: Driving a food web model with external spatial–temporal data. *Ecological Modelling.* 2013. V. 263. P. 139–151. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2013.04.027.
13. *Vasilev P.V., Chistov S.V.* Mapping of Lake Pskov bioproductivity. *Nauchnye issledovaniya molody huchenyh-kartografov, vypolnennye pod rukovodstvom sotrudnikov kafedry kartografii I geoinformatiki geograficheskogo fakulteta MGU imeni M.V. Lomonosova / M.V. Zimin, P.E. Kargashin, M.V. Kusilman et al. (Eds.).* M.: KDU, 2017. P. 14–24 (in Russian).