

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ПСКОВСКОГО ОЗЕРА

*Васильев П.В.,
Чистов С.В.*

Резюме – Псковское озеро характеризуется высокой для озер умеренной зоны биологической и, в том числе, рыбопродуктивностью. Большинство современных исследований в этой сфере базируется на моделях, отражающих пресноводные водоемы в целом, а пространственно-временные особенности и закономерности формирования продуктивности остаются практически неизученными. Для решения этой актуальной научной проблемы авторами разработана оригинальная методика создания серии тематических карт на ряд эталонных лет. По итогам апробации методики выявлены важные особенности в формировании зон с высокой продуктивностью ихтиофауны в Псковском озере, связанные с гидрологическими условиями, характерными для выбранных эталонных лет. Полученные результаты свидетельствуют о высокой перспективности использования картографического метода исследования в изучении пространственно-временных особенностей формирования биопродуктивности экосистем внутренних водоемов.

Ключевые слова – биогеографическое картографирование, картографический метод исследования, биопродуктивность, ихтиофауна, Псковское озеро.

MAPPING OF LAKE PSKOV BIOPRODUCTIVITY

*Vasilev P. V.,
Chistov S. V.*

Abstract – Lake Pskov is characterized by a high biological and, in particular, fish productivity among the lakes of the temperate zone. The most part of the modern researches in this area is based on models representing freshwater reservoirs in general, and the spatio-temporal features and regularities in the productivity formation remain almost unexplored. We have developed a methodology for creating a series of thematic maps for a number of reference years in order to solve this topical scientific problem. Based on results of the methodology approbation for a number of reference (characteristic) years, we revealed important features in the formation of zones with high productivity of ichthyofauna in Lake Pskov, which are primarily associated with hydrological conditions typical for the selected reference years. Our results indicate high prospects of using the cartographic method of research in studying spatio-temporal features of the bioproductivity formation in inland water ecosystems.

Keywords – biogeographical mapping, cartographic method of research, bioproductivity, ichthyofauna, Lake Pskov.

Введение

Псковское озеро является частью единого Псковско-Чудского озера, состоящего из трех частей: Чудского, Теплого и Псковского озер. Его отличительной особенностью является уникально высокая для озер умеренной зоны биологическая и, в частности, рыбопродуктивность (до 3–4 т/км²) [6].

К числу основных промысловых видов рыб, обитающих в Псковском озере, относятся окунь, лещ и судак. Велики также уловы плотвы, ерша и щуки. Немаловажное значение имеет густера, но уже не как промысловый вид, а как объект пропитания хищных рыб (щуки, судака, окуня) [3].

На сегодняшний день, несмотря на более чем полуторазековую историю гидробиологических и экологических исследований как отдельно Псковского, так и Псковско-Чудского озера в целом, пространственно-временные особенности и закономерности формирования его биопроductивности остаются практически неизученными. Связано это, во многом, с тем, что большинство используемых в рамках этих исследований методов анализа и моделирования не учитывает факторы пространственной неоднородности водоема как биотопа, которые в значительной степени влияют на функционирование и формирование продуктивности озерной экосистемы.

Для решения этой актуальной научной проблемы наилучшим образом подходит картографический метод исследования, базирующийся на принципах и методах математико-картографического и геоинформационного моделирования. При изучении биоресурсов внутренних вод этот метод применяется довольно часто, особенно за рубежом [8, 9, 10]. В нашей стране подобные исследования с использованием картографического метода практически не проводятся, а те немногие из них, которые опираются на принципы математико-картографического моделирования, направлены, преимущественно, на изучение морей и океанов [1, 5, 11]. Что касается Псковского озера, то картографический метод в оценке его биопроductивности ранее никогда не применялся.

Целью настоящего исследования была разработка методики картографического анализа и оценки пространственно-временных особенностей формирования биопроductивности озерной экосистемы (на примере Псковского озера).

Исходные данные

В Псковском озере, как и во многих других водоемах, осуществляется научно-исследовательский траловый лов рыбы. В российских водах озера траловые съемки проводятся Псковским отделением Государственного научно-исследовательского института озерного и речного рыбного хозяйства им. Л. С. Берга (ГосНИОРХ) по несколько раз в год (в среднем, 2–3 раза в разные сезоны года). Важной особенностью данных траловых является наличие у них позиционной составляющей – координат начальной и конечной точек траления. Это делает пригодными для картографирования результаты траловых обследований водоема.

Данные траловых съемок в общем случае включают следующую информацию: номер (обозначение) трала, координаты начальной и конечной точек, дату и время начала и окончания траления, скорость судна, температуру воды, вылов по отдельным видам рыб и размерам (длине) экземпляров и примечания (номер условного квадрата, попадание в трал посторонних сетей и других предметов и т.д.).

Для проведения настоящего исследования в качестве исходных данных был взят массив фотографий страниц журналов, содержащих результаты траловых съемок, проводившихся на озере Псковским отделением ГосНИОРХ в период с 1999 по 2011 гг.

С целью выбора из всего этого набора данных годов, в которые фиксация результатов траловых съемок осуществлялась с высокой степенью подробности и структурированности была проведена классификация результатов всех траловых съемок за этот период.

По результатам проведенной классификации были выбраны эталонные (характерные) годы, для которых результаты траловых съемок в достаточной степени информативны: 2003, 2006 и 2008. Материалы 6 траловых съемок, проведенных в эти годы (по 2 съемки в год), были взяты в качестве исходных данных для разработки и апробации методики, а именно: 26–29 мая и 28–30 октября 2003 г.; 22–25 мая и 21–24 августа 2006 г.; 9–11 июня и 25–26 октября 2008 г.

В формировании биопродуктивности озерных экосистем значительную роль играет сток взвешенных наносов, который осуществляется реками, питающими эти озера [4]. На р. Великую приходится более 90% объема годового поверхностного стока в Псковское озеро [7]. В связи с этим, было принято решение выбрать именно ее в качестве водного объекта, гидрологические условия которого следует проанализировать для отмеченных выше эталонных лет.

Из всех действующих на р. Великой гидрологических постов ниже всего по течению, а значит, и наиболее близко к самому Псковскому озеру, расположен пункт наблюдений в г. Псков. На этом посту измерение мутности и расходов взвешенных наносов, однако, не осуществляется. С величиной расхода взвешенных наносов из всех гидрологических характеристик, фиксируемых на этом посту, более всего связан уровень воды.

Исходные данные о ходе уровня воды в р. Великой в створе гидрологического поста г. Псков и в Псковском озере (пост о. Залита) для 2003, 2006 и 2008 гг. были взяты из [2].

Помимо гидрологических условий, на формирование биопродуктивности озерных экосистем существенное влияние оказывает также характер рельефа дна водоемов [4]. В качестве исходных данных о рельефе дна Псковского озера были взяты путевые и частные карты внутренних водных путей, а также лоции.

Методы

С учетом имеющейся информации была разработана методика картографического анализа и оценки пространственно-временных особенностей формирования биопродуктивности озерной экосистемы и составлена серия аналитических и комплексных карт.

Схематично эта методика представлена на рис. 1. Вначале следует отметить, что на схеме слева с I по V этап представлены виды работ, результатом которых стали аналитические и комплексные карты продуктивности ихтиофауны на два сезона за эталонные годы. Справа на схеме VI и VII этапы отмечают работы по созданию цифровой модели рельефа (ЦМР) дна водоема, а также пространственную привязку карт внутренних водных путей. И наконец, VIII и IX этапы исследований посвящаются эколого-географическому анализу пространственно-временных особенностей формирования зон высокой продуктивности ихтиофауны, как отдельных видов рыб (аналитические карты), так и для их сочетаний (комплексные карты).

Рассмотрим отдельно каждый из этапов обработки и анализа данных, проводимых в рамках этой методики.

На первом этапе осуществляется предварительная обработка исходных записей в траловых журналах посредством формализации и структурирования представленных в них результатов траловых съемок с выделением позиционных и семантических характеристик тралов, как на рис. 1.

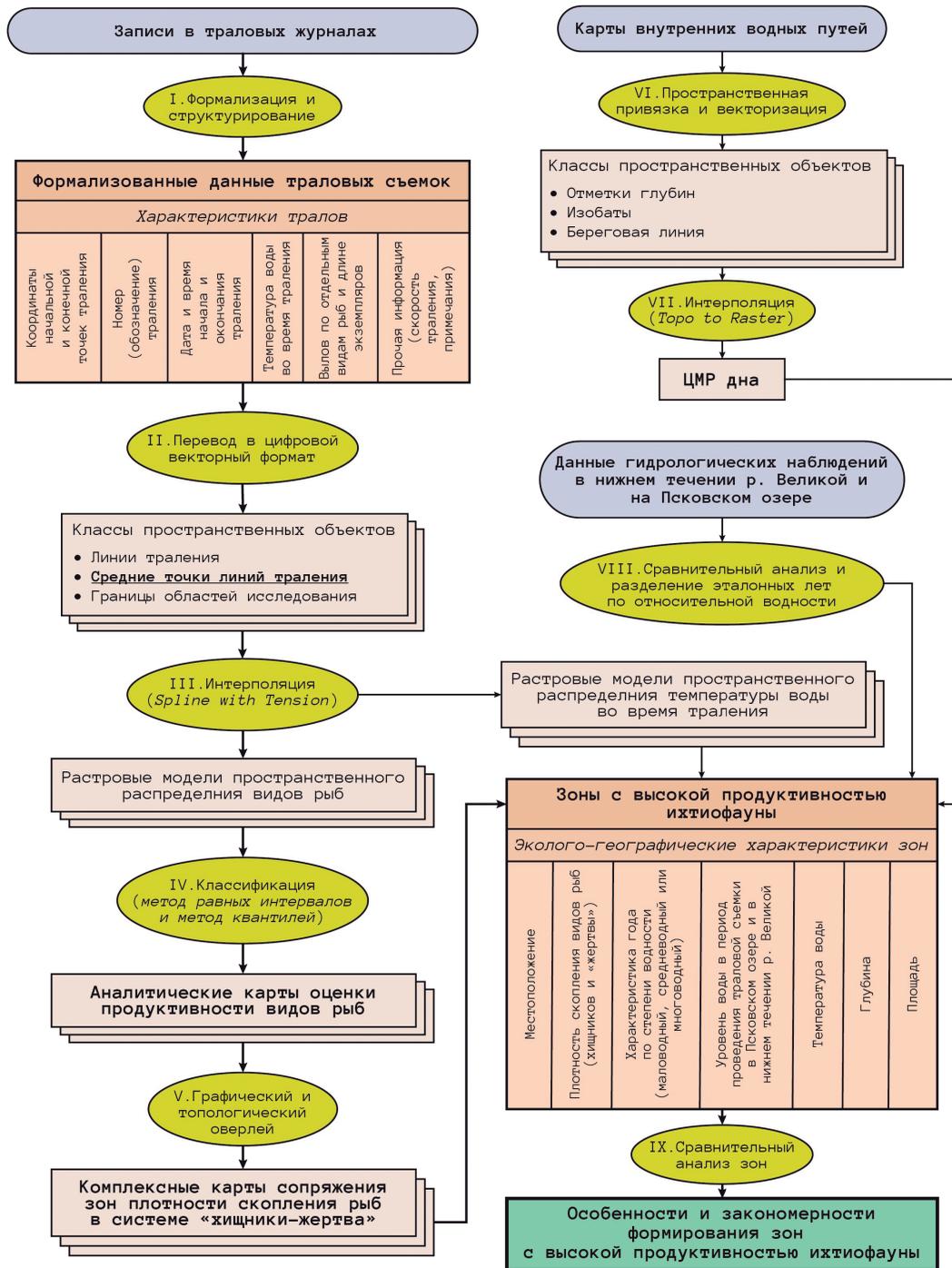


Рис. 1. Схема методики картографического анализа и оценки пространственно-временных особенностей формирования биопроductивности Псковского озера

На втором этапе выполняется перевод формализованных в виде таблиц данных траловых съемок в цифровой векторный формат средствами инструментария геообработки *ArcToolbox* ГИС-пакета *ArcGIS for Desktop*.

Для каждого массива данных, соответствующего одной траловой съемке, на выходе формируются 3 класса пространственных объектов, исходя из положения тралов в акватории озера, зафиксированном в траловых журналах в виде координат начальной и конечной точек траления: линии траления, средние точки линий траления (как ис-

ходные точки для последующей интерполяции), граница области исследования (интерполяции).

На этом этапе также производится расчет удельного вылова рыбы на единицу площади протральной акватории, который далее используется в качестве основного показателя при оценке продуктивности отдельных представителей ихтиофауны.

На третьем этапе осуществляется интерполяция (континуализация) показателя удельного вылова по каждому виду рыб на единицу площади акватории по средним точкам линий траления в пределах области исследования. В качестве метода интерполяции используется метод сплайнов с натяжением (*Spline with Tension*), дающий, как показывает экспериментальное моделирование, наиболее правдоподобные результаты, соответствующие традиционным для географии и картографии представлениям о плавном и непрерывном рисунке изолиний реальных и абстрактных геополей.

В результате формируются растровые модели, характеризующие пространственное распределение каждого представителя ихтиофауны в виде показателя плотности его скопления в пределах границ области интерполяции в периоды проведения соответствующих траловых съемок.

Дополнительно на этом этапе с применением того же метода интерполяции строятся растровые модели пространственного распределения температуры воды у поверхности во время траления с целью их использования в дальнейшем анализе.

На четвертом этапе выполняется классификация полученных растровых моделей пространственного распределения видов рыб двумя методами:

1. «Экспертная (ручная) классификация» в соответствии с 5-ступенчатой равно-интервальной шкалой.
2. Классификация по методу квантилей с выделением трех классов, равных по количеству входящих в них ячеек модели. Эти три класса соответствуют зонам высокой, средней и низкой плотности скопления данного вида рыбы в пределах исследуемой акватории (области интерполяции) в период проведения траловой съемки, т.е. отражают оценку продуктивности вида.

На основе полученных моделей составляются аналитические карты оценки продуктивности видов рыб. Пример такой карты приведен на рис. 2.

Далее на пятом этапе реализуются процедуры графического и топологического оверлея зон плотности скопления рыб. Составляемые аналитические карты продуктивности отдельных видов рыб являются основой для создания комплексных карт оценки биопродуктивности, в т.ч. карт сопряжений (соответствий в пространстве) зон плотности скопления рыб в системе «хищники–жертва».

Эти системы интересны с точки зрения изучения особенностей пространственного распределения рыб тем, что в них одновременно рассматриваются связанные прямыми трофическими связями звенья пищевой сети: хищники и их «жертвы» (мирные виды – объекты питания хищников) как консументы, соответственно, более высокого и низкого порядка. Следовательно, высокая степень сопряжения зон плотности хищников и их «жертвы» будет явно свидетельствовать о существенной роли последней в спектре питания хищных рыб. Приуроченность участков сопряжения к зонам высокой плотности «жертвы», в свою очередь, будет четко указывать на наличие в данном месте благоприятных для обитания рассматриваемых видов рыб условий, а значит, и на большую рыбопродуктивность этих участков.

В нашем случае 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».

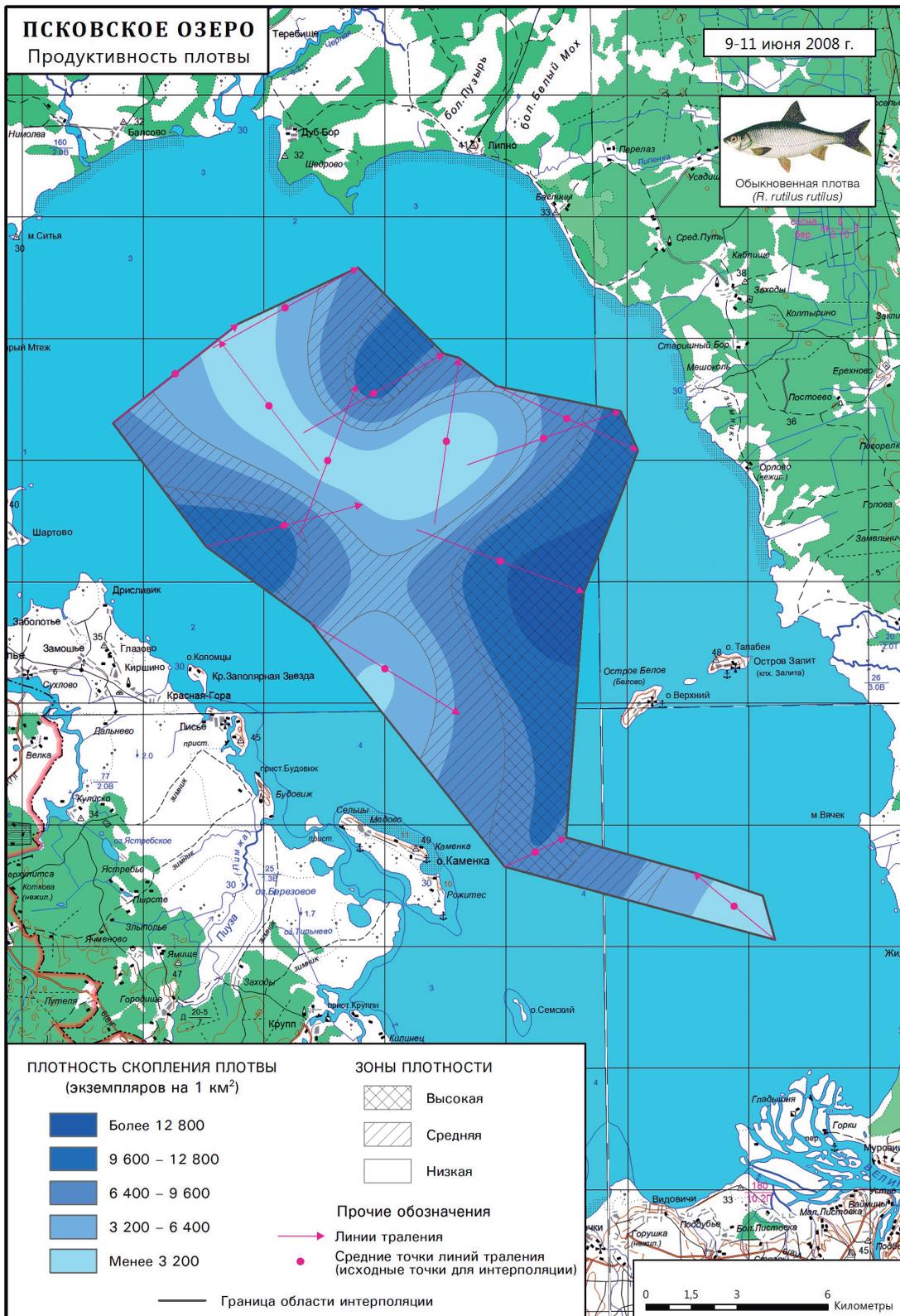


Рис. 2. Пример аналитической карты оценки продуктивности вида

Комплексные карты сопряжения зон плотности скопления рыб в системе «хищник–жертва» создаются на основе графического и топологического оверлея зон с высокой плотностью скопления хищников и зон с высокой и, отдельно, средней и низкой плотностью скопления рассматриваемой «жертвы». Пример такой комплексной карты приведен на рис. 3.

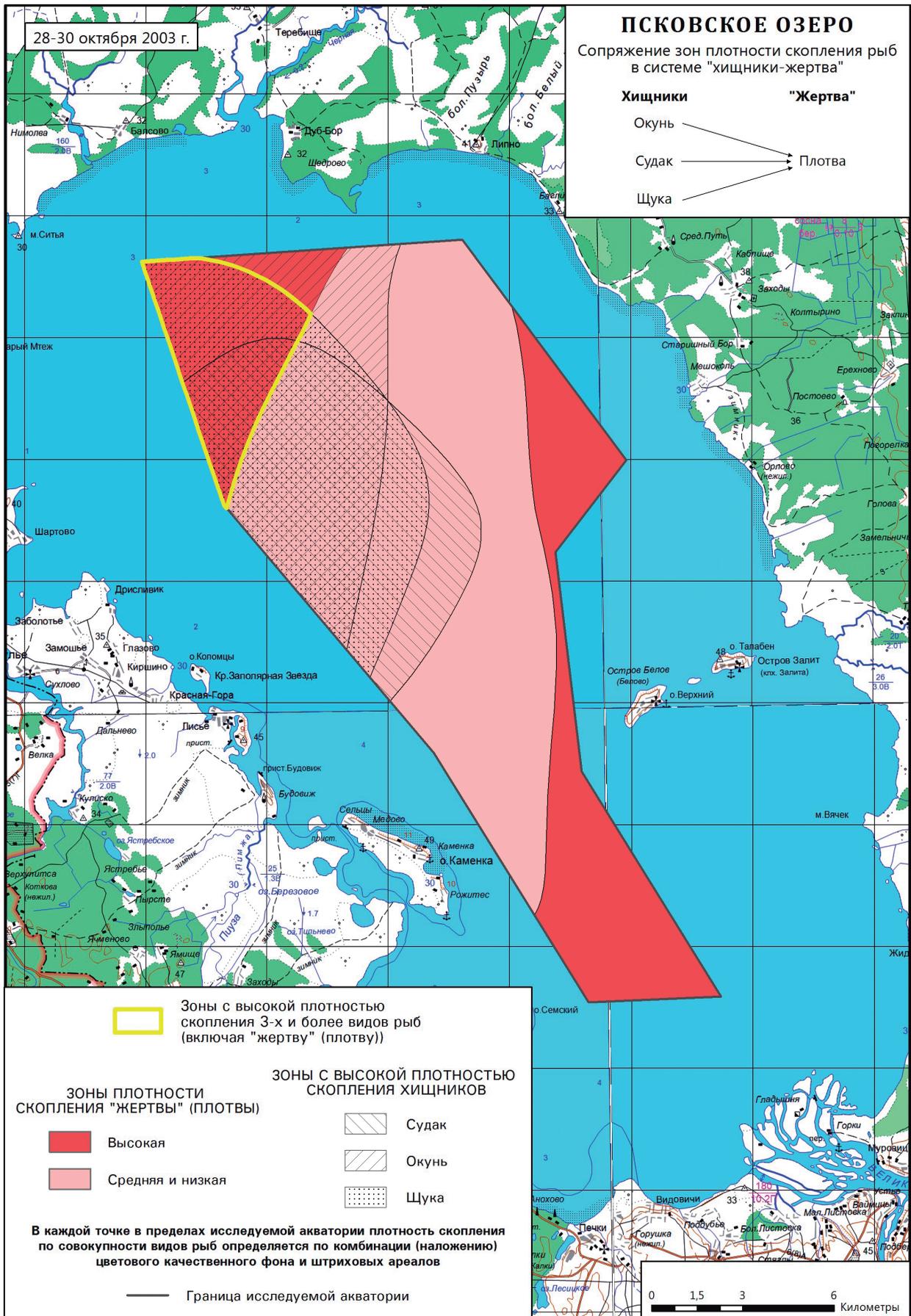


Рис. 3. Пример комплексной карты сопряжения зон плотности скопления рыб в системе «хищники–жертва»

Отдельно на картах сопряжения выделяются зоны с высокой плотностью скопления трех и более видов рыб, включая «жертву». Такие зоны представляют наибольший интерес в плане выявления факторов, определяющих формирование благоприятных условий для обитания рыб и, соответственно, их высокой продуктивности, а также установления степени влияния этих факторов.

В нашем случае, для 6 траловых съемок, проводившихся на Псковском озере в 2003, 2006 и 2008 гг., было выявлено 8 зон с высокой продуктивностью ихтиофауны, сравнительный анализ эколого-географических характеристик которых производился в дальнейшем.

На шестом и седьмом этапах выполняется подготовка данных и построение ЦМР дна водоема с целью как можно более точного и достоверного определения интервалов глубин выявленных зон с высокой продуктивностью ихтиофауны (ВПИ).

По результатам пространственной привязки и векторизации карт внутренних водных путей формируются классы пространственных объектов: отметки глубин, изобаты и береговая линия водоема. По ним далее с использованием инструмента *Topo to Raster* ГИС–пакета *ArcGIS for Desktop* строится ЦМР дна.

На восьмом этапе производится сравнительный анализ гидрологических данных в нижнем течении р. Великой и на Псковском озере с целью типологии эталонных лет по их относительной водности. Для этого строятся графики хода уровня воды в р. Великой (в створе гидрологического поста г. Псков) относительно нуля этого поста на 2003, 2006 и 2008 гг. На основе сравнительного анализа полученных графиков эти годы были разделены по относительной водности: 2003 – средневодный, 2006 – маловодный, 2008 – многоводный.

Наконец, на заключительном этапе выполняется сравнительный анализ зон ВПИ по совокупности следующих эколого-географических характеристик:

- 1) местоположение зоны ВПИ в акватории озера;
- 2) плотность скопления (в количестве экземпляров на 1 км²) видов рыб (хищников и «жертвы»), в особенности, тех, чьи значения плотности в пределах зоны ВПИ максимальны по акватории;
- 3) характеристика эталонного года по степени водности (маловодный, средневодный или многоводный);
- 4) уровень воды (в метрах Балтийской системы) в период проведения траловой съемки на двух постах Росгидромета: о. Залита (Псковское оз.) и г. Псков (р. Великая);
- 5) температура воды у поверхности (°С) в пределах зоны ВПИ;
- 6) глубина (м) в пределах зоны ВПИ;
- 7) площадь зоны (км²), а также суммарная площадь зон за период проведения траловой съемки и суммарная площадь выявленных зон за эталонный год.

По итогам анализа формулируются выводы об особенностях и закономерностях формирования зон с высокой продуктивностью ихтиофауны в озере.

Полученные результаты

По итогам апробации разработанной методики картографического анализа и оценки пространственно-временных особенностей формирования биопродуктивности экосистемы Псковского озера для выбранных эталонных лет траловых съемок (2003, 2006 и 2008 гг.) выявлены следующие особенности в формировании зон с высокой продуктивностью ихтиофауны:

1. Чем более многоводен год, тем выше количество и больше суммарная площадь формируемых в течение года зон с высокой плотностью скопления рыб.
2. Для года с большой относительной водностью характерно формирование зон в центральной части акватории озера, для года с малой водностью — на более близких к берегу участках, в т.ч. рядом с устьями и дельтами рек.
3. Преобладающие глубины на участках Псковского озера, где формируются зоны ВПИ, составляют 4,1–4,6 м. При повышении уровней воды и в Псковском озере, и в р. Великой (по сравнению с характерными в рассматриваемый год величинами) средние глубины в пределах зон также увеличиваются. Эта закономерность сохраняется даже при приведении глубин к среднему многолетнему меженному уровню воды в озере.
4. Формирование зон с высокой плотностью скопления рыб происходит преимущественно на участках с температурой воды у поверхности, соответствующей средним и ниже среднего значениям по акватории.

Что касается взаимосвязи плотности скопления видов рыб в зонах ВПИ и гидрологических условий (водности, температуры воды), то она, согласно полученным результатам, оказывается практически не выраженной, так как максимальные и минимальные значения плотности для 4 рассматриваемых видов фиксируются при совершенно разных параметрах водности, температуры и глубины.

В связи с этим, можно предположить, что плотность скопления определяется другими, не рассмотренными в рамках проведенного исследования факторами, в первую очередь — гидрохимического характера: концентрациями растворенного кислорода (O_2), азота (N), фосфора (P), загрязняющих веществ и т.д.

Выводы

Разработанная и апробированная на примере Псковского озера для эталонных (характерных) лет методика картографического анализа и оценки пространственно-временных особенностей формирования биопродуктивности озерной экосистемы позволила выявить важные особенности в формировании зон с высокой продуктивностью ихтиофауны в данном водоеме, которые связаны, прежде всего, с гидрологическими условиями (водностью). Это подтверждает распространенное среди специалистов-ихтиологов мнение о необходимости использования данных гидрологических наблюдений за температурой, уровнем воды и ледовым режимом водных объектов при оценке продуктивности ихтиофауны.

Полученные результаты подтверждают высокую перспективность применения картографического метода исследования в изучении пространственно-временных особенностей формирования биопродуктивности экосистем внутренних водоемов. Дополнительное привлечение данных натуральных измерений, мониторинговых наблюдений и аэрокосмических исследований (как дополнительных источников информации о состоянии водной среды) позволит существенно расширить возможности для комплексного изучения динамических режимов как отдельных компонентов экосистемы водоема (в частности, ихтиоценоза), так и его биотического сообщества в целом. Данный подход будет способствовать решению не только вышеупомянутой научной проблемы, но также и важных задач прикладного характера, таких как, например, оптимизация промыслового режима биологических ресурсов Псковско-Чудского озера.

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

Список литературы

- [1] *Бизиков В. А., Гончаров С. М., Поляков А. В.* Географическая информационная система «КартМастер» // Рыбное хозяйство. 2007. №1. С. 96–99.
- [2] Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России // Информационно-аналитический центр регистра и <http://gis.vodinfo.ru/>. Дата обращения: 25.08.2017.
- [3] *Концевая Н. Я.* Состояние сырьевых ресурсов и промысла рыбы в Псковско-Чудском озере и их многолетние изменения // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ. Вып. 341. С. 84–119.
- [4] Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.
- [5] *Пак Р. А., Коломейко Ф. В., Архипов А. Г.* Использование современных геоинформационных технологий в исследованиях ранних стадий развития промысловых рыб северной части Центрально-Восточной Атлантики // Известия КГТУ. 2016. №42. С. 39–48.
- [6] *Саускан В. И., Тылик К. В.* Сырьевая база рыбной промышленности России. М.: МОРКНИГА, 2013. 329 с.
- [7] *Эдельштейн К. К.* Псковское озеро // Научно-популярная энциклопедия «Вода России». – Режим доступа: http://water-rf.ru/Водные_объекты/202/Псковское_озеро. Дата обращения: 25.08.2017.
- [8] *Fisher W.* Current issues, status and applications of GIS to inland fisheries // Meaden G. J., Aguilar–Manjarrez, J., eds. *Advances in geographic information systems and remote sensing for fisheries and aquaculture*. Rome: FAO, 2013. P. 269–296.
- [9] *Sandström A. et al.* Assessing the potential of remote sensing-derived water quality data to explain variations in fish assemblages and to support fish status assessments in large lake // *Hydrobiologia*. 2016. Vol. 780, issue 1. P. 71–84.
- [10] *Sandström A. et al.* Has climate variability driven the trends and dynamics in recruitment of pelagic fish species in Swedish Lakes Vänern and Vättern in recent decades // *Aquatic Ecosystem Health & Management*. 2014. Vol. 17, issue 4. P. 349–356.
- [11] Study of associativity between the spatial distributions of gray whales and their prey species offshore north-east coast of Sakhalin island / Y. Kriksunov, A. Alyautdinov, A. Bobyrev, S. Chistov // *Regional Studies in Marine Science*. 2016. Vol. 8, no. 3. P. 466–479.

References

- [1] *Bizikov V. A., Goncharov S. M., Polyakov A. V.* Geograficheskaya informacionnaya sistema «KartMaster» // Rybnoe hozyajstvo. 2007. №1. p. 96–99.
- [2] Informacionnaya sistema po vodnym resursam i vodnomu hozyajstvu bassejnov rek Rossii // Informacionno-analiticheskij centr registra i kadastra RGAU–MSKHA im. K.A. Timiryazeva. – Rezhim dostupa: <http://gis.vodinfo.ru/>. Data obrashcheniya: 25.08.2017.
- [3] *Koncevaya N. YA.* Sostoyanie syr'evyh resursov i promysla ryby v Pskovsko-CHudskom ozere i ih mnogoletnie izmeneniya // Sb. nauch. tr. GosNIORH. Issue 341, p. 84–119.
- [4] Metodika izucheniya biogeocenzov vnutrennih vodoemov. M.: Nauka, 1975. 240 pp.
- [5] *Pak R. A., Kolomejko F. V., Arhipov A. G.* Ispol'zovanie sovremennyh geoinformacionnyh tekhnologij v issledovaniyah rannih stadij razvitiya promyslovyh ryb severnoj chasti Central'no-Vostochnoj Atlantiki // Izvestiya KGTU. 2016. №42. p. 39–48.
- [6] *Sauskan V. I., Tylik K. V.* Syr'evaya baza rybnoj promyshlennosti Rossii. M.: MORKNIGA, 2013. 329 pp.
- [7] *Ehdel'shtejn K. K.* Pskovskoezero // Nauchno-populyarnaya ehnciklopediya «Voda Rossii». – Rezhim dostupa: [http://water-rf.ru/Vodnye_ob"ekty/202/Pskovskoe_ozero](http://water-rf.ru/Vodnye_ob). Data obrashcheniya: 25.08.2017.
- [8] *Fisher W.* Current issues, status and applications of GIS to inland fisheries // Meaden G. J., Aguilar–Manjarrez, J., eds. *Advances in geographic information systems and remote sensing for fisheries and aquaculture*. Rome: FAO, 2013, p. 269–296.

- [9] *Sandström A. et al.* Assessing the potential of remote sensing-derived water quality data to explain variations in fish assemblages and to support fish status assessments in large lake // *Hydrobiologia*. 2016. Vol. 780, issue 1. p. 71–84.
- [10] *Sandström A. et al.* Has climate variability driven the trends and dynamics in recruitment of pelagic fish species in Swedish Lakes Vänern and Vättern in recent decades // *Aquatic Ecosystem Health & Management*. 2014. Vol. 17, issue 4. p. 349–356.
- [11] Study of associativity between the spatial distributions of gray whales and their prey species offshore north-east coast of Sakhalin island / Y. Kriksunov, A. Alyautdinov, A. Bobyrev, S. Chistov // *Regional Studies in Marine Science*. 2016. Vol. 8, no. 3. P. 466–479.

Авторы

Васильев П. В. — магистр географии по специальности картография и геоинформатика, аспирант 1-го года обучения.

Чистов С. В. — доцент кафедры картографии и геоинформатики, кандидат географических наук.

Authors

Vasilev P. V. — Master of Geography, specializing in cartography and geoinformatics, post-graduate student of the 1-st year of study.

Chistov S. V. — Associate Professor of the Department of Cartography and Geoinformatics, Candidate of Geographical Sciences.