

Геоинформационная веб-система для обеспечения гидробиологического мониторинга на примере зообентоса р. Енисей

А. В. Андрианова^{1,2}, О. Э. Якубайлик^{1,*}

¹Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

²Научно-исследовательский институт экологии рыбохозяйственных водоемов, Красноярск, Россия

*Контактный e-mail: oleg@icm.krasn.ru

Изучено современное состояние сообществ эндемичных байкальских амфипод в р. Енисей на участке от плотины Красноярской ГЭС до устья р. Ангары. На основе данных многолетних экспедиционных исследований сформирована геопространственная база данных с результатами наблюдений, которая размещена на геопортале ИВМ СО РАН в отдельном тематическом разделе. Сервисы геопортала предоставляют возможности визуализации данных в виде интерактивных тематических карт и прямого доступа к данным через картографические веб-сервисы из современных ГИС. Использование методов геоинформационного и картографического моделирования в анализе пространственного распределения байкальских амфипод помогает в поиске взаимосвязей с различными факторами природной среды, обеспечивает проведение качественных и количественных оценок различных параметров.

Ключевые слова: геопортал, веб-картография, геопространственные данные, гео-данные, гидробиологический мониторинг, зообентос, байкальские амфиподы.

Введение

Главная водная артерия Сибири — Енисей входит в число семи самых крупных рек мира и считается наиболее многоводной рекой нашей страны. По экосистеме Енисея за многолетний период наблюдений накоплен обширный массив разнообразных данных биотического и абиотического характера, которые являются ценным материалом для анализа. Использование новых методов обработки данных, таких как геоинформационное и картографическое моделирование, позволит получить дополнительную информацию о пространственных особенностях распределения гидробионтов и поможет в поиске взаимосвязей с различными факторами природной среды.

Использование современных технологий геоинформационных систем и глобальной сети Интернет обеспечивает эффективное решение всех задач, связанных с представлением, обработкой и анализом геопространственных данных. Формирование геопространственной базы данных, содержащей результаты экспедиционных исследований,

и внедрение геоинформационной веб-системы для информационно-аналитического обеспечения гидробиологического мониторинга является основой междисциплинарных исследований.

1. Задачи гидробиологического мониторинга

Известно, что с вводом в эксплуатацию Красноярской ГЭС в р. Енисей произошло коренное изменение гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов. Последствия зарегулирования прослеживаются на расстоянии более 1.5 тыс. км от створа гидроузла. Экологические перестройки в сообществах гидробионтов требуют углубленного изучения и многолетнего мониторинга как для оценки нанесенного экологического ущерба, так и для выработки научных основ стратегии преодоления негативных последствий и восстановления биологического потенциала экосистемы Енисея. В настоящее время система гидробиологического мониторинга на Енисее практически отсутствует.

Комплексный мониторинг водных экосистем невозможен без исследования такого важного биологического звена, как сообщества зообентоса. Зообентос — это беспозвоночные животные (например, пиявки, моллюски, ракообразные, черви, личинки насекомых и др.), обитающие в водоемах на поверхности грунта и в его толще. Роль зообентоса в водных экосистемах сложно переоценить. Во-первых, сообщество донных беспозвоночных — это звено в трофической цепи и пищевой объект для большинства видов сибирских рыб (осетровых, сиговых, хариусовых, карповых и др.). Во-вторых, организмы зообентоса способствуют естественному самоочищению природных вод, поскольку в процессе своей жизнедеятельности становятся активными минерализаторами органических веществ и биофильтраторами воды. В-третьих, это надежные биоиндикаторы экологического состояния разнотипных водных объектов, поскольку существует четкая связь между показателями зообентоса и содержанием загрязняющих веществ в придонных слоях воды и донных отложениях. Под влиянием загрязнения происходят структурные перестройки донных сообществ и снижается видовое разнообразие.

Одной из главных характеристик зообентоса, так же как и его отдельных представителей, является плотность (отношение количества организмов к единице занимаемого пространства), которая выражается через численность (экз./м²) и биомассу (г/м²).

Зарегулирование Енисея привело к глобальным изменениям в зообентосе реки, прежде всего — это распространение выше устья Ангары амфипод (ракообразных) байкальского происхождения. Их доля в биомассе зообентоса Енисея увеличилась в 10 раз, и они заняли доминирующее положение [1, 2]. Известно, что ракообразные являются одними из самых активных гидробионтов, самостоятельно расселяющихся за пределы естественных ареалов. Кроме того, с целью обогащения кормовой базы рыб байкальские амфиподы успешно вселялись во многие водохранилища и озера СССР [3]. Инвазии этих организмов приводят к значительным изменениям в водоемах-реципиентах, в частности к снижению видового разнообразия и устойчивости водных экосистем [4].

Оценка экологических последствий вселения чужеродных организмов в водные экосистемы имеет чрезвычайно большое значение. Не менее важна связанная с ней проблема оценки рисков инвазий водных организмов. Последствия вселения амфипод, которые относятся к видам-загрязнителям, слабо изучены и требуют длительных исследований.

2. Архитектура созданной геоинформационной веб-системы

Первым картографическим веб-приложением считают созданную в 1993 г. программу Map Viewer Исследовательского центра Пало-Альто компании Херох (PARC), которая позволяла пользователям в интерактивном режиме отправлять запросы из браузера к серверу и получать фрагменты карт в формате GIF. Именно это приложение с его функциональной концепцией стало родоначальником большинства более поздних версий картографических веб-систем. Ориентировочно с 1998 г. в процесс создания систем указанного класса включились крупные компании — производители программного обеспечения ГИС (ESRI, Intergraph и др.) начинают разработку коммерческих приложений для веб-картографии. В это же время в университете штата Миннесота разрабатывается наиболее успешный из некоммерческих проектов с открытым исходным кодом — MapServer. В настоящее время идет интенсивное формирование рынка веб-картографии. Возникают многочисленные программные разработки — от простых средств визуализации заранее подготовленных карт в браузере до сложных распределенных систем обработки корпоративной геопространственной информации [5].

Сложившаяся в результате концепция разработки картографического веб-приложения предполагает создание комплекса программ, выполнение которых осуществляется одновременно на компьютере-сервере и компьютере-клиенте (многозвенная архитектура), а также формирование набора пространственных данных — как правило, в формате популярных ГИС или с использованием специализированной геопространственной СУБД. При этом первоначальная подготовка геоданных для веб-приложения осуществлялась за рамками веб-ГИС, для этого использовалась настольная ГИС QGIS [6].

Содержанием сформированной геопространственной базы данных (рис. 1) стали результаты экспедиционных исследований — данные по численности и биомассе зообентоса в р. Енисей (от плотины Красноярской ГЭС до устья р. Ангары), их распределение по видам, берегам Енисея, глубине, типу грунта, наличию высшей водной растительности.

Отличительными характеристиками рассматриваемой в настоящей работе геоинформационной веб-системы для решения задач гидробиологического мониторинга являются:

- интеграция картографического веб-приложения в систему управления веб-контентом, ее средства управления доступом пользователей, администрирования и настройки интерфейса, формирования информационных блоков веб-портала;
- совершенствование пользовательского интерфейса (создание элементов управления картой и геоданными в стиле традиционных настольных ГИС — плавающие панели с инструментами-кнопками, интерактивные древовидные раскрывающиеся меню со списками слоев карты, контекстная настройка свойств отображения данных и т. д.);
- расширенная поддержка информационного обмена геоданными между элементами картографического веб-приложения и сторонними системами на основе открытых технологических стандартов — веб-сервисов;
- оформление наборов используемых геопространственных данных в виде каталогов с соответствующими метаданными, создание самостоятельных программных средств для навигации и поиска геоинформации в этих каталогах.

Интерфейс пользователя рассматриваемых систем реализован как веб-ресурс с двумя видами доступа — пользовательским и административным. Пользовательский интерфейс предназначен для навигации и поиска опубликованных информационных ре-

Геоportal Данные и сервисы Тематические разделы О портале Войти

Исследования водных экосистем в ИВМ СО РАН

Геоportal ИВМ СО РАН

Главная > Исследования > Исследования водных экосистем в ИВМ СО РАН

Исследования зообентоса в р. Енисей

Зообентос – это совокупность животных организмов, обитающих на грунте и в грунте дна водоёмов.

Результаты исследований зообентоса р. Енисей, которые выполнялись более 10 лет, показывают его большое разнообразие – в составе донной фауны основного русла выявлено 164 вида беспозвоночных из 8 классов, 20 отрядов. На участке р. Енисей от плотины Красноярской ГЭС до устья р. Ангары зообентос состоял в основном из амфипод (ракообразные), хирономид (комары) и олигохет (черви). Доля ракообразных в зообентосе реки в среднем колебалась от 17 до 37% общей численности. В целом амфиподы вносили 25% от общей численности и 54% от общей биомассы донного населения.

1. Численность и биомасса амфипод по видам

Пространственная динамика численности и биомассы амфипод отличалась неоднородным распределением, однако наблюдается четкое снижение показателей *Eulimnogammarus viridis* от верховья исследованного участка к устью Ангары. При этом для *Gmelinoides fasciatus* картина обратно противоположная, что, вероятно, указывает на конкурентные взаимоотношения байкальских вселенцев при освоении биотопов (мест обитания) в р. Енисей. В целом, количественно в Енисее преобладает *Gmelinoides fasciatus* – его численность превышает такую для *Eulimnogammarus viridis* более чем вдвое.

Численность амфипод (по видам)

Общая характеристика научных исследований

Гидробиологические исследования р. Енисей

Исследования зообентоса в р. Енисей

Общая характеристика исследований зообентоса

Результаты исследований зообентоса в р. Енисей

Список публикаций по результатам исследований

Рис. 1. Тематический раздел по водным экосистемам геопортала ИВМ СО РАН

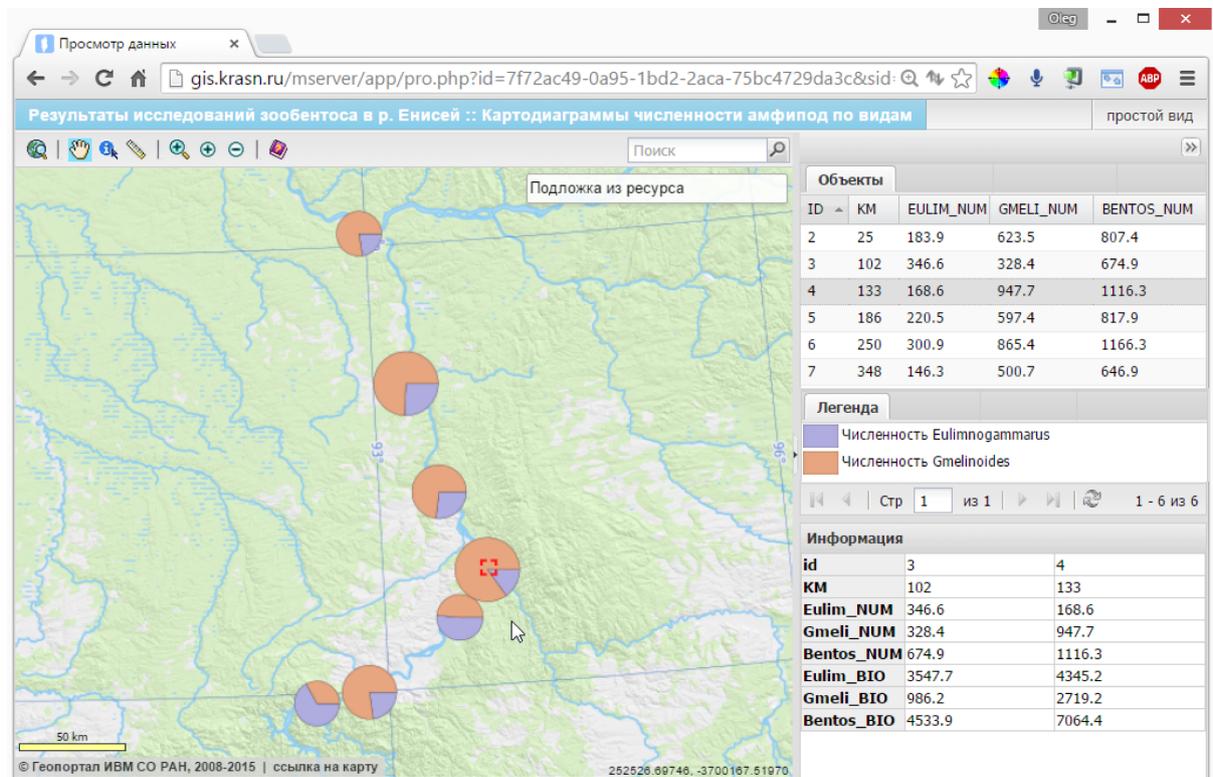


Рис. 2. Картографический интерфейс пользователя геопортала ИВМ СО РАН

сурсов (рис. 2). Административный интерфейс позволяет редактировать различные данные, создавать новые информационные ресурсы, управлять их публикацией, различными характеристиками представления информации [7].

Разработка основана на СУБД PostgreSQL 8.x с модулем PostGIS для хранения пространственных данных, языке сценариев PHP 5.x для реализации бизнес-логики приложений. Формирование пользовательских и программных интерфейсов осуществлялось с помощью многочисленных свободно распространяемых библиотек и технологий open source — Ext2js, TinyMCE, HTML_MetaForm, Smarty, PEAR, Zend Framework и др.

3. Результаты гидробиологических исследований

Представленные материалы являются частью комплексной работы “Определение продукционного потенциала кормовых ресурсов рыб р. Енисей на участке от плотины Красноярской ГЭС до пос. Зотино”, которая была начата еще в 2000-е гг. Первостепенная роль в кормовых ресурсах рыб рассматриваемого участка принадлежит донной фауне. Одной из главных задач являлась оценка изменений, произошедших в донной фауне реки после ее зарегулирования.

По физико-географическим условиям, характеру строения долины и русла, водному режиму Енисей делят на три участка: верхний (исток — устье р. Ангары), средний (р. Ангара — устье р. Нижней Тунгуски) и нижний (р. Нижняя Тунгуска — устье р. Енисей). Исследования охватили участок реки протяженностью около 780 км в среднем течении Енисея: 325 км — в горном Верхнем Енисее (от плотины Красноярской ГЭС до устья р. Ангары) и 456 км — в полугорном Среднем Енисее (от устья р. Ангары до пос. Зотино). При выполнении полевых работ для отбора проб зообентоса на указанном участке р. Енисей было выбрано 10 разрезов.

Отбор и обработку проб бентоса выполняли согласно стандартным гидробиологическим методикам. На каждом разрезе забор грунта производился у обоих берегов на глубине по двум грациям (менее 1 м и от 1 до 2 м) с помощью кругового скребка Дулькейта (площадь захвата $1/9 \text{ м}^2$), спроектированного в 1930-е гг. специально для Енисея. При сборе гидробиологического материала определяли глубину водотока, температуру воды, скорость течения, тип грунта и степень зарастания водотока макрофитами (высшей водной растительностью).

Всего за период исследований собрано около 300 проб зообентоса в р. Енисей и его притоках. Все полученные результаты обработаны с использованием программ Microsoft Excel и Statistica 9. На рис. 3 совокупные данные представлены в виде средних арифметических, ошибки средней, доверительных интервалов. Для сопоставления данных использовали t -критерий Стьюдента при вероятности 95 % ($p = 0.05$).

Для формирования геопространственной базы данных использовались материалы о пространственном распределении амфипод, которые в настоящее время доминируют в сообществах зообентоса Енисея. На исследованном участке выявлено 7 видов амфипод, однако среди них в массе развиваются и явно доминируют только два вида, которые являются байкальскими эндемиками: *Eulimnogammarus viridis* (Dybowsky, 1874) и *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899).

Пространственная динамика численности и биомассы амфипод в р. Енисей (см. рис. 2) отличалась неоднородным распределением, однако четко проявляется тенденция снижения при переходе от верхнего к нижнему участку (т. е. выше и ниже Ангары).

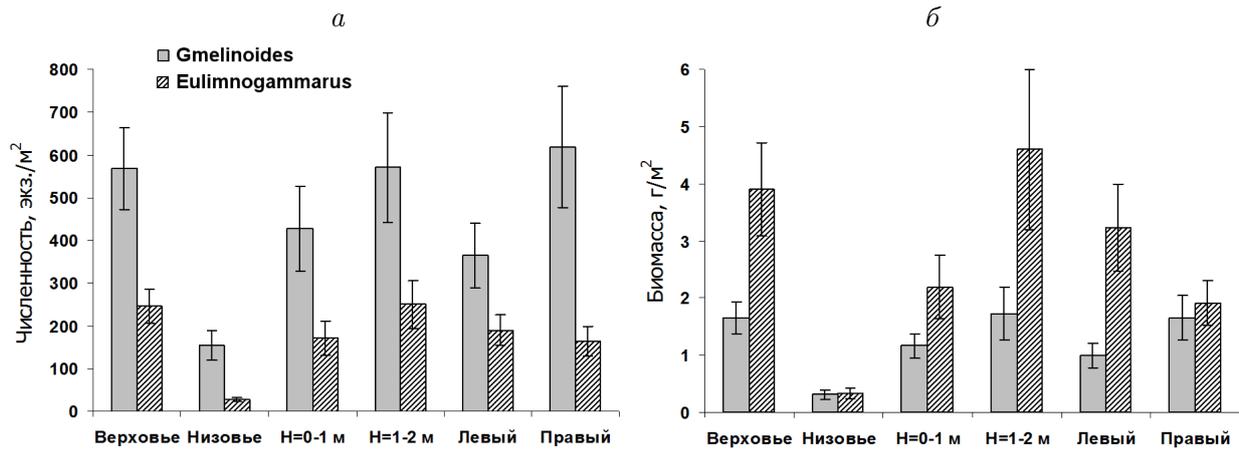


Рис. 3. Некоторые особенности пространственного распределения амфипод в р. Енисей

Выявлено, что количество *Gmelinoides* превышает численность *Eulimnogammarus* более чем вдвое на верхнем участке и более чем впятеро на нижнем (см. рис. 3). Известно, что бокоплав *Gmelinoides* экологически очень пластичный вид. Он выносит значительное эвтрофирование, устойчив к ряду загрязнителей, способен адаптироваться к комплексу неблагоприятных факторов и одним из первых заселять биотопы, загрязненные промышленными стоками [8].

Правый берег Енисея имеет более разветвленную речную сеть, в связи с этим численность и биомасса *Gmelinoides* здесь несколько выше; для *Eulimnogammarus* такая тенденция не отмечена. Кроме того, выявлено некоторое увеличение численности и биомассы обоих видов амфипод с глубиной.

4. Представление данных гидробиологического мониторинга с помощью ГИС

Первым этапом создания веб-ГИС для гидробиологического мониторинга стало формирование набора геопространственных данных для регистрации в ГИС результатов экспедиционных исследований и визуализации результатов. В частности, проведена работа по геопривязке листов лоции по спутниковым снимкам локально-аффинными преобразованиями (по не менее чем 15 точкам для каждого листа), созданию слоев векторных данных с фарватером, километровыми отметками, створами водотока и т. д. Для визуализации различных данных по фарватеру и берегам реки (левому/правому) также была сформирована серия специализированных слоев полигонального и линейного типа.

На втором этапе были разработаны алгоритмы пересчета и генерализации массива исходных данных гидробиологического мониторинга в систему геопозиционированных значений с учетом используемой агрегации данных. В результате работы данного программного обеспечения формируются тематические слои геоданных, визуализация которых выполняется штатными средствами геопортала ИВМ СО РАН.

Рассматриваемая геоинформационная веб-система строится в так называемой сервис-ориентированной архитектуре — ее можно рассматривать как комплекс взаимосвязанных программных компонентов для операций с пространственными данными — их импорта/экспорта, каталогизации, визуализации, создания, обработки, распространения

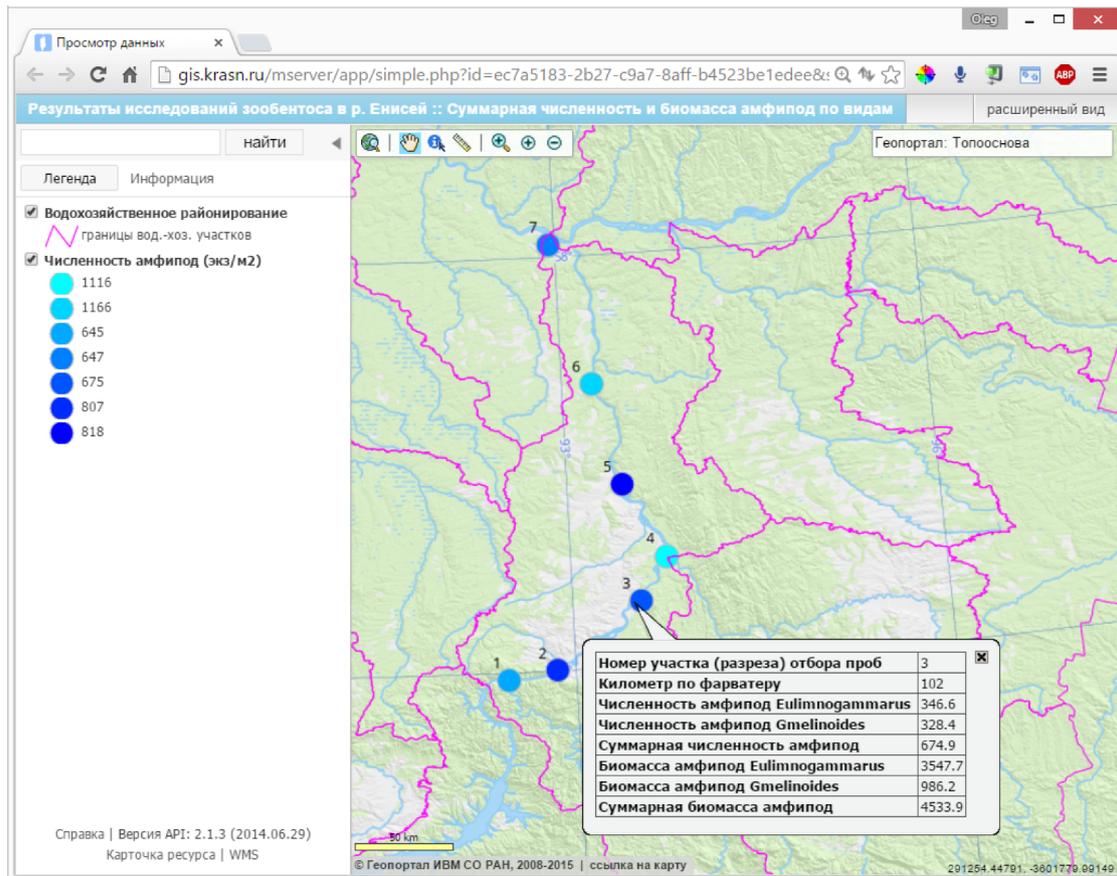


Рис. 4. Визуализация данных по численности и биомассе байкальских амфипод в р. Енисей на геопортале ИВМ СО РАН

и т. д. Технологической основой является набор библиотек программных интерфейсов; они обеспечивают доступ к функциям и контексту картографических элементов веб-страниц, средствам визуализации тематических данных. Основные характеристики системы — высокая степень интерактивности интерфейса пользователя, очень быстрая регенерация изображений, сформированных из небольших кэширующихся растровых фрагментов (тайлов), практически мгновенный отклик инструментов перемещения (сдвига) и изменения масштаба карты, широкие возможности настройки визуализации и управления пространственными данными. Обеспечена поддержка стандартов обмена пространственными данными — KML, GML, WMS и проч. [9].

Созданная система основана на геопортале ИВМ СО РАН. Геопортал — это тип веб-портала, используемого для доступа и поиска географической (геопространственной) информации и связанных с ней географических веб-сервисов (доступ, редактирование и проч.). Это один из ключевых компонентов инфраструктуры пространственных данных. Функциональные возможности геопортала тесно связаны с подсистемой управления метаданными, средствами пространственного анализа, интерактивной визуализации (рис. 4). В качестве системной основы для публикации контента выбрана популярная CMS — система управления веб-контентом Drupal.

Для информационного наполнения геопространственной базы данных на текущем этапе работ использовался материал по зообентосу, собранный на участке от плотины Красноярской ГЭС до устья р. Ангары.

Заключение

Опыт проектирования и разработки различных научно-исследовательских и прикладных систем показывает высокую эффективность использования геоинформационных веб-систем и сервисов в качестве основы для интеграции информационно-аналитических ресурсов и геопространственных данных.

Модульная архитектура системы, использование стандартных веб-сервисов для обмена данными между этими модулями обеспечивает быструю адаптацию имеющегося программного обеспечения под требования заказчика, тиражирование отдельных компонентов, их взаимодополняемость. В свою очередь, регистрация создаваемых ресурсов — пространственных данных в централизованном каталоге геопортала — обеспечивает возможность их повторного применения. Такой сервис-ориентированный подход, основанный на активном внедрении веб-технологий в прикладные информационные системы, все чаще применяется в настоящее время.

Список литературы / References

- [1] **Андрианова А.В.** Динамика развития енисейского зообентоса в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Вест. ТГУ. Биология. 2013. № 1(21). С. 74–88.
Andrianova, A.V. Dynamics of Yenisei zoobenthos evolution in the downstream of Krasnoyarsk Hydroelectric Power Station // Tomsk State University Journal. 2013. No. 1(21). P. 74–88. (In Russ.)
- [2] **Гладышев М.И., Москвичева А.В.** Байкальские вселенцы заняли доминирующее положение в бентофауне верхнего Енисея // Докл. АН. 2002. Т. 383, № 4. С. 568–570.
Gladyshev, M.I., Moskvicheva, A.V. Baikal invaders have become dominant in the upper Yenisei benthofauna // Doklady Biological Sciences. 2002. Vol. 383, No. 1-6. P. 138–140.
- [3] **Матафонов Д.В., Итигилова М.Ц., Камалтынов Р.М.** Особенности экспансии *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899) водоемов Восточного Забайкалья (на примере озера Арахлей) // Сибирский экологический журнал. 2006. Т. 13, № 5. С. 595–601.
Matafonov, D.V., Kamaltynov, R.M., Itigilova M.T. Features of expansion of *Gmelinoides fasciatus* (Stebbing, 1899) in water bodies of East Transbaikalia (for lake Arakhley as example) // Siberian Journal of Ecology 2006. Vol. 13, No. 5. P. 595–601. (In Russ.)
- [4] **Berezina, N.A.** Invasions of alien amphipods (Amphipoda: Gammaridea) in aquatic ecosystems of North-Western Russia: pathways and consequences // Hydrobiologia. 2007. Vol. 590. P. 15–29.
- [5] **Якубайлик О.Э., Попов В.Г.** Технологии для геоинформационных Интернет-систем // Вычисл. технологии. 2009. Т. 14, № 6. С. 116–126.
Yakubailik, O.E., Popov, V.G. Technologies for internet geographic information systems // Comput. Technologies. 2009. Vol. 14, No. 6. P. 116–126. (In Russ.)
- [6] **Кадочников А.А., Попов В.Г., Токарев А.А., Якубайлик О.Э.** Формирование геоинформационного Интернет-портала для задач мониторинга состояния природной среды и ресурсов // Журн. СФУ. Серия: Техника и технологии. 2008. Т. 1, № 4. С. 377–386.
Kadochnikov, A.A., Popov, V.G., Tokarev, A.V., Yakubailik, O.E. Implementation of internet GIS portal for environment and natural resources monitoring tasks // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2008. Vol. 1, No. 4. P. 377–386. (In Russ.)

- [7] **Якубайлик О.Э.** Геоинформационная Интернет-система мониторинга состояния природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли // Вест. СибГАУ. 2010. Т. 1, № 27. С. 40–45.
Yakubailik, O.E. Geoinformation internet system for environmental monitoring in the productive activity area of oil and gas industry enterprises // Vestnik SibGAU. 2010. Vol. 1, No. 27. P. 40–45. (In Russ.)
- [8] **Барбашова М.А., Малявин С.А., Курашов Е.А.** Находка байкальской амфиподы *Micruropus possolskii* Sowinsky, 1915 (Amphipoda, Crustacea) в Ладожском озере // Российский журнал биологических инвазий. 2013. Т. 6, № 3. С. 16–23.
Barbashova, M.A., Malavin, S.A., Kurashov, E.A. First finding of baikalian amphipod *Micruropus possolskii* Sowinsky, 1915 (Amphipoda, Crustacea) in lake Ladoga // Russian Journal of Biological Invasions. 2013. Vol. 4, No. 4. P. 219–224.
- [9] **Якубайлик О.Э., Гостева А.А., Ерунова М.Г., Кадочников А.А., Матвеев А.Г., Пятаев А.С., Токарев А.В.** Разработка средств информационной поддержки наблюдений за состоянием окружающей природной среды // Вест. КемГУ. 2012. № 4/2(52). С. 136–142.
Yakubailik, O.E., Gosteva, A.A., Erunova, M.G., Kadochnikov, A.A., Matveev, A.G., Pyataev, A.S., Tokarev, A.V. Developing information support tools for observations of the environment state // Bulletin of Kemerovo State University. 2012. No. 4/2(52). P. 136–142. (In Russ.)

*Поступила в редакцию 16 ноября 2015 г.,
с доработки — 8 декабря 2015 г.*

Geographic information web system providing the hydrobiological monitoring on the example of Yenisei river zoobenthos

ANDRIANOVA, ANNA V.^{1,2}, YAKUBAILIK, OLEG E.^{1,*}

¹Institute of Computational Modeling SB RAS, Krasnoyarsk, 660036, Russia

²Institute of Ecology of Fishery Reservoirs, Krasnoyarsk, 660097, Russia

*Corresponding author: Yakubailik, Oleg E., e-mail: oleg@icm.krasn.ru

The current condition of endemic Baikal amphipod communities in the part of the river Yenisei from the dam of Krasnoyarsk hydroelectric power station to the mouth of the river Angara was studied. On the basis of data of long-term field researches geospatial database with results of observations was formed. This database is located on the geportal of the Institute of Computational Modeling SB RAS on the separate topic section.

Purpose. The purpose of this study is a theoretical and practical research on the opportunities of using modern GIS technologies to improve the efficiency of hydrobiological monitoring, to design software tools for web mapping and data analysis of field researches.

Methods. Firstly, construction technologies of distributed informational systems in multitier architecture, program interfaces and protocols, standards of information exchange were observed according to the considered class of problems. Secondly, there were studied the abilities of these methods of geoinformation and cartographic modelling

in the analysis of spatial distribution of Baikal amphipods — in the search of interrelations to different factors of the environment, qualitative and quantitative evaluation of various parameters.

Results. The present study has an interdisciplinary character. On one hand, it contains the results of the hydrobiological research, connected with the determination of production potential of fish forage resources in the part of the Yenisei river from the dam of Krasnoyarsk hydroelectric power station to the mouth of the river Angara. On the other hand, the result of the completed work is the formation of program-technological support of the hydrobiological monitoring system by the example of Yenisei zoobenthos, the development of geospatial database and the thematic section in the geoportal of the Institute of Computational Modeling SB RAS. Geoportal services provide data visualization in the form of interactive thematic maps and the instant access to the data through the cartographic web-services of modern GIS.

Conclusion. Modern GIS web-systems and technologies have ample opportunities, which can significantly improve the efficiency of hydrobiological monitoring. Information and analytical support of the monitoring system, based on the considered approach, can simplify the access to the necessary information, provide new opportunities for analysis and modelling and can promote the development of interdisciplinary studies.

Keywords: geoportal, web mapping, spatial data, geodata, hydrobiological monitoring, zoobenthos, Baikal amphipods.

Received 16 November 2015

Received in revised form 8 December 2015