

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА ИНВАЗИВНОГО ПРОЦЕССА БАЙКАЛЬСКИХ ЭНДЕМИЧНЫХ РАКООБРАЗНЫХ В Р. ЕНИСЕЙ

Андреанова А.В.⁽¹⁾⁽²⁾, Якубайлик О.Э.⁽¹⁾⁽³⁾

¹ Институт вычислительного моделирования СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск

² НИИ Экологии рыбохозяйственных водоемов, Красноярск

³ Сибирский федеральный университет, Красноярск

Рассматривается современное состояние эндемичных байкальских амфипод в р. Енисей, приводятся результаты экспедиционных исследований. Отмечается факт многократного увеличения плотности амфипод в Енисее после зарегулирования плотиной Красноярской ГЭС. Данные гидробиологического мониторинга оформлены в виде геопространственной базы данных на геопортале, который предоставляет возможности визуализации результатов исследований в виде интерактивных тематических карт, прямой доступ к данным через картографические веб-сервисы из современных ГИС.

Ключевые слова: р. Енисей, амфиподы, *Gmelinoides fasciatus*, *Philolimnogammarus viridis*, биотопы, зообентос, пространственное распределение, геоинформационная система, геопортал, веб-картография.

Введение. Строительство Красноярской ГЭС в 70-е годы прошлого века вызвало коренное изменение гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов р. Енисей. В нижнем бьефе ГЭС Енисей в зимнее время не замерзает на протяжении 100–300 км от плотины; влияние ГЭС на ледовый режим реки прослеживается до устья р. Подкаменная Тунгуска. Зарегулирование Енисея привело к глобальным перестройкам в гидробиологических сообществах. Произошла смена доминирующих форм фитопланктона, обогащение его видового состава и увеличение общей численности водорослей за счет стока из верхнего бьефа; резко возросло количество фитобентоса и фитоперифитона, ставшего даже помехой в работе водозаборов. Изменение гидрологического режима оказало значительное воздействие на популяции осетровых и других ценных видов рыб, существенно нарушив их ареалы [1].

Зообентос Енисея в результате гидростроительства также претерпел масштабные перестройки, особенно в нижнем бьефе ГЭС. Из донной фауны практически исчезли веснянки и мошки, значительно уменьшилась плотность и число видов ручейников и поденок. Количественные характеристики зообентоса на участке от плотины Красноярской ГЭС до устья Ангары существенно возросли: численность увеличилась более чем в 2 раза, биомасса – в 5 раз. Рост показателей обусловлен прежде всего распространением гаммарид из оз. Байкал через р. Ангару вверх по течению Енисея, при этом их доля в общей биомассе зообентоса увеличилась в 10 раз [2, 3].

В этом контексте особый интерес представляет пространственное распределение амфипод на всем протяжении реки Енисей, анализ динамики протекающих процессов. По экосистеме Енисея за многолетний период 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, обеспечивает возможность получения дополнительной информации о пространственных особенностях распределения гидробионтов, помогает в поиске взаимосвязей с различными факторами природной среды [4].

Гидробиологические исследования. В течение вегетационных сезонов 2015 г. (июль – август) и 2016 г. (июль – сентябрь) осуществлялись сборы макрозообентоса в р. Енисей от истока до дельты включительно. Пробы отбирали у обоих берегов, преимущественно в прибрежной зоне на глубине до 1 м; лишь в дельте Енисея имелась возможность изъять грунт с глубин до 14 м. В зависимости от типа грунта и гидрологических условий использовали утяжеленный дночерпатель Петерсена (площадь захвата 0,025 м²), а также количественные рамки, бентометры и скребки (площадь захвата 0,06 - 0,13 м²). При сборе гидробиологического

материала определяли глубину, температуру воды, содержание растворенного кислорода, прозрачность, скорость течения, степень зарастания макрофитами, тип грунта.

В Верхнем Енисее для сбора гидробиологического материала было намечено 15 станций: из них 2 расположены в пределах республики Тыва, 3 – ниже Саяно-Шушенского вдхр. от г. Саяногорска до г. Минусинска, и 10 – на участке от плотины Красноярской ГЭС до устья р. Ангары. В Среднем Енисее исследовали участок от устья р. Ангары до пос. Сургутиха – 21 станция, в Нижнем Енисее зообентос собирали на 12 станциях – от г. Дудинка до дельты, включая Бреховские острова. На каждой станции изымали по 2-5 проб грунта, для данного исследования в Енисее обработано и проанализировано 178 количественных проб донной фауны. Пробы грунта разбирали в полевых условиях, беспозвоночных животных фиксировали 70%-м этиловым спиртом, в лаборатории пробы зообентоса обрабатывали, анализ материала проводили общепринятыми гидробиологическими методами.

Результаты гидробиологических исследований. В Енисее нами обнаружено несколько видов амфипод, но на всем протяжении реки встречался лишь *Gmelinoides fasciatus* Stebb. В Верхнем Енисее на территории республики Тыва он являлся единственным и редким представителем высших ракообразных, ниже Саяно Шушенского вдхр. единично встречался *Philolimnogammarus viridis* Dybowsky. Ниже плотины Красноярской ГЭС видовой состав амфипод расширился за счет *Gammarus sp.*, *Ph. cyaneus* Dybowsky, *Pallasea cancelloides* Gerstfeldt, *Eulimnogammarus verrucosus* Gerstfeldt. В Среднем Енисее после впадения Ангары данный комплекс амфипод сохранялся, но на смену *Gammarus sp.* пришел *Micruropus sp.* В Нижнем Енисее наибольший вес приобрела *Pontoporeia affinis* Lindstrom, тогда как *Ph. cyaneus* и *E. verrucosus* в пробах, напротив, отсутствовали.

Количество амфипод в различных зонах Енисея существенно варьировалось. На самом верхнем исследованном участке (республика Тыва) в условиях высокой скорости течения и крупного каменисто-галечного грунта амфиподы представлены крайне бедно – единично встречался лишь *G. fasciatus*. Наибольшей плотности амфиподы достигали ниже Саяно-Шушенского водохранилища в районе городов Саяногорск и Минусинск (3,8 тыс. экз./м² и 10,4 г/м²), при этом их доля в зообентосе в среднем составила 70% численности и 53% биомассы (табл. 1). Далее по течению количество амфипод снижалось и в Нижнем Енисее упало в среднем до 0,3 тыс. экз./м² при биомассе 0,6 г/м² (13% численности и 7% биомассы донной фауны).

Наиболее распространенным видом на исследуемой территории является *Gmelinoides fasciatus*. *G. fasciatus* в Верхнем Енисее присутствовал во всех собранных пробах, максимальной плотности достигал в районе городов Саяногорск (3018 км от устья Енисея) и Минусинск (2901 км): до 17,6 тыс. экз./м² и 25,6 г/м². Средние показатели на этих станциях составили более 4 тыс. экз./м² и 7-8 г/м² (рис. 1). Следует отметить, что на данном участке в Енисее велика степень зарастаемости русла погруженными и полупогруженными макрофитами, которые служат благоприятным биотопом для массового развития *G. fasciatus*.

Еще один количественный всплеск *G. fasciatus* в Верхнем Енисее отмечен ниже г. Красноярска (пос. Кубеково, 2439 км) у левого берега на илистом грунте; численность здесь достигала 6,3 тыс. экз./м², биомасса – 9,3 г/м². Низкая плотность гмелиноидеса в Верхнем Енисее зарегистрирована после плотины Красноярской ГЭС (2500, 2482 км) и в районе устья правобережного притока р. Кан (2356 км) – менее 0,1 тыс. экз./м² при биомассе 0,2-0,8 г/м².

В Среднем Енисее (после впадения Ангары) встречаемость *G. fasciatus* составила 80%, высокое обилие отмечалось на нескольких станциях в пределах 2095 – 1863 км от устья (Рис. 1). Максимальные скопления выявлены в Баженовской курье (2008 км) и протоке Еловая (1863 км) – до 4,2 тыс. экз./м² и 17,0 г/м². После впадения левобережного притока р. Кас (1819 км от устья) гмелиноидес встречался лишь в половине собранных проб, его плотность в Енисее резко снизилась и не превышала 0,8 тыс. экз./м² и 3,0 г/м² (в протоке Касовской). Лишь в конце исследованного участка Среднего Енисея в районе о. Сургутинский (1235 км) наблюдалось скопление амфипод у правого берега численностью 1,3 тыс. экз./м² при биомассе 3,8 г/м². Резкое снижение плотности амфипод на нижнем плесе Среднего Енисея объясняется,

скорее всего, гидрологическими особенностями этого участка, поскольку после впадения р. Подкаменной Тунгуски вдвое уменьшается уклон русла, что приводит к понижению скорости течения и к накоплению иловых отложений [5]. Минимальные показатели *G. fasciatus* (0,01 тыс. экз./м² при биомассе 0,07 г/м²) отмечены в районе Вороговского многоостровья (1636 км), которое имеет важное значение для развития и нагула молоди осетровых, поскольку здесь расположены их нерестилища. Участок отличается большим количеством островов, проток и заводей, значительной площадью мелководий, здесь особенно распространены илистые грунты.

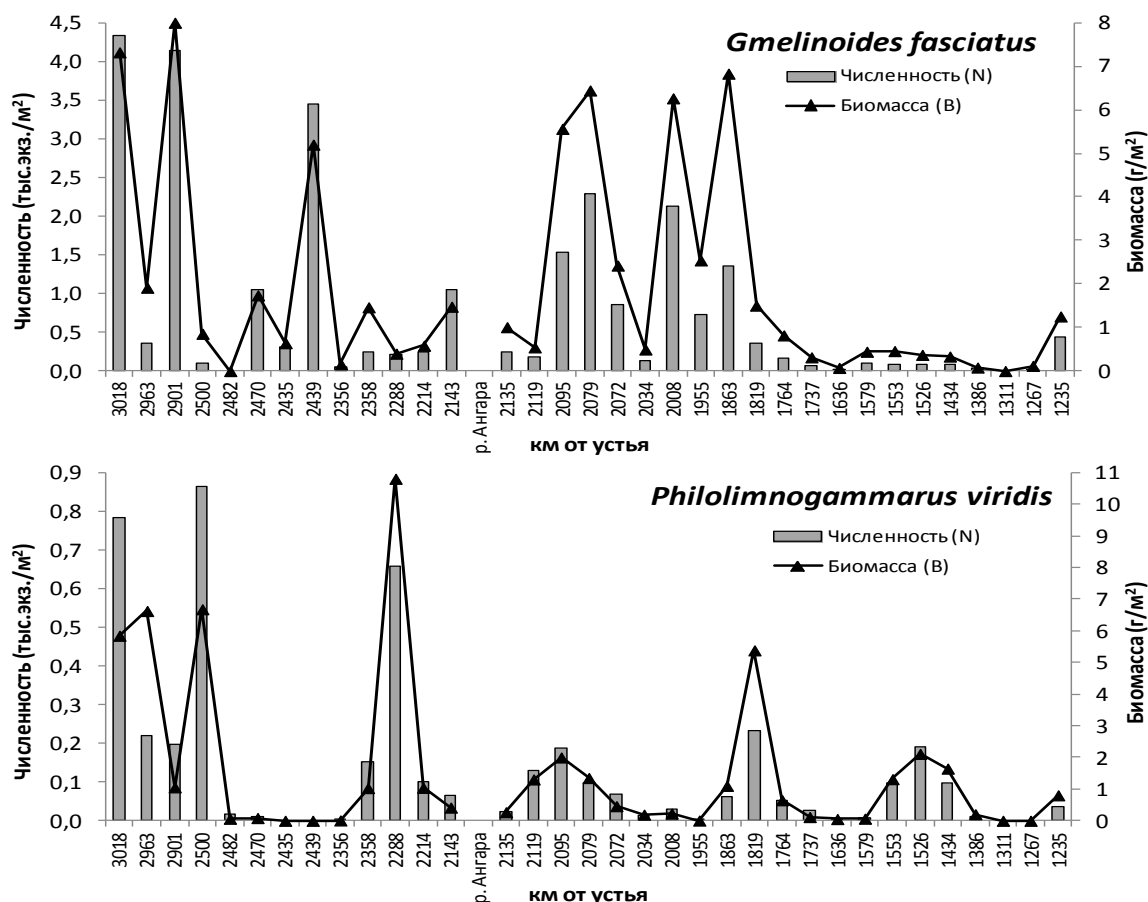


Рис. 1. Пространственная динамика численности и биомассы *G. fasciatus* и *Ph. viridis* в Верхнем (выше впадения р. Ангара) и Среднем (ниже впадения р. Ангара) Енисее.

В нижнем течении ветры большой силы, особенно осенью, вызывают частые штормы и резкие колебания уровня воды. Сильное прибойное действие волн отрицательно отражается на обитателях прибрежной зоны, обычно слагающейся здесь из легкоразмываемых грунтов. Плотность *G. fasciatus* в низовье Енисея резко упала по сравнению с верхними участками, его встречаемость в пробах составила всего 26%. Максимальные количественные показатели (численность 1,1 тыс. экз./м² при биомассе 3,9 г/м²) выявлены локально в протоке Малый Енисей (Бреховские острова), но средняя плотность гмелиноидеса не превышала 0,6 тыс. экз./м² и 2,4 г/м² (район г. Дудинка, 424 км от устья).

В процессе выполнения работ также проводились исследования пространственного распределения других организмов. Количественное преимущество на исследованных участках Енисея имели *G. fasciatus* и, в меньшей степени, *Ph. viridis*, в дельте их сменила *P. affinis*. Пространственная динамика количественных показателей доминирующих видов амфипод на всех исследованных участках Енисея отличалась крайней неоднородностью [6].

Геоинформационная база данных. Выполненные в рамках настоящей работы исследования и разработки в области геоинформационного обеспечения задач гидробиологического мониторинга являются продолжением работ, начатых в 2015 г [7]. В основе создаваемого ин-

формационного обеспечения – размещенная на геопортале ИВМ СО РАН геопространственная база данных, которая была актуализирована, дополнена новыми результатами исследований. Геопортал предоставляет средства для визуализации и обработки геоданных, доступа к ним из сторонних прикладных программ на основе картографических веб-сервисов [8].

В рамках рассматриваемого этапа исследований была актуализирована информация по гидрографии бассейна р. Енисей. На основе данных геопортала, подготовленных на основе сведений Государственного водного кадастра (водного реестра), была выполнена геопривязка точек наблюдений гидробиологического мониторинга к километровым отметкам вдоль фарватера р. Енисей («система координат реки»); использование такой системы координат дает возможность оценки различных параметров по течению реки. Был также сформирован набор специализированных слоев геопространственных данных [9].

Разработанное программно-технологическое решение для аналитической обработки и презентации данных гидробиологического мониторинга основано на сочетании существующих программных средств и наборов данных – коллекции специально разработанных слоев в геоинформационной системе, программных инструментов специализированного геокодирования данных, технологических решений по обработке табличной информации в Excel и статистических пакетах программ, средств импорта/экспорта в ГИС на основе свободного программного обеспечения QGIS, и проч.

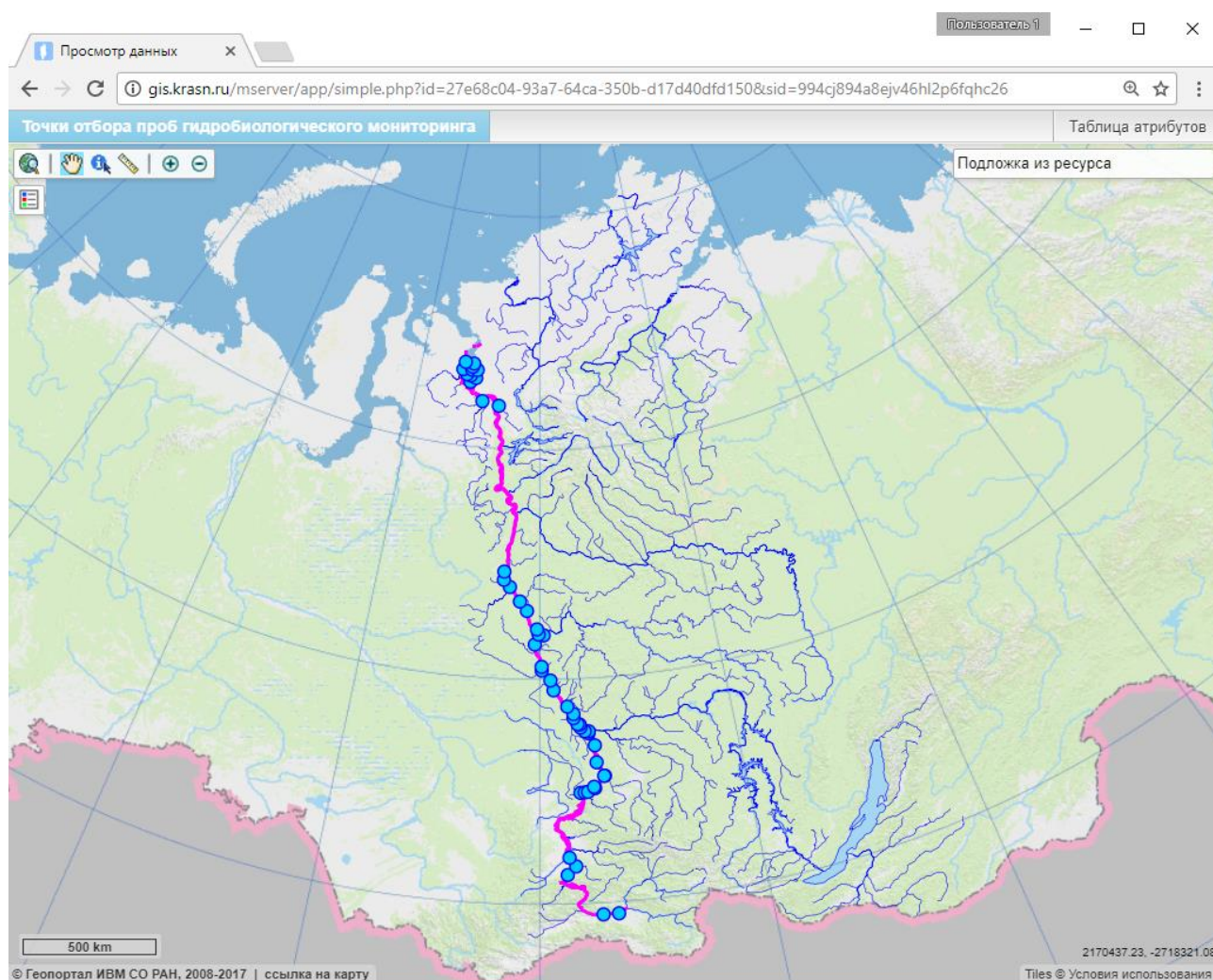


Рис. 2. Веб-интерфейс геопортала ИВМ СО РАН: р. Енисей, речная сеть бассейна р. Енисей, точки отбора проб геоинформационной базы данных гидробиологического мониторинга.

Также был предложен и реализован новый механизм для отображения контекстной информации о выбранных объектах на карте – на основе шаблонов. Шаблоны позволяют гибко

настраивать дизайн и содержание информационного всплывающего окна с данными о выбранном объекте карты: менять стилевое оформление – цвет, параметры шрифтов, и т.д., размещать фотографии, размещать на форме интерактивные элементы – меню, селекторы, и проч., запускать внешние скрипты для запросов к сторонним данным [10].

Заключение. Создание геопрограммной базы данных с результатами экспедиционных исследований и внедрение геоинформационной веб-системы для информационно-аналитического обеспечения гидробиологического мониторинга значительно расширяет возможности в анализе и представлении геоданных, формирует основу междисциплинарных исследований. Для рассматриваемой предметной области такой подход представляется особенно актуальным, учитывая значительно пространственное распределение информации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гадинов А.Н. Структура зообентоса нижнего бьефа р. Енисей до и после строительства плотины Красноярской ГЭС // Проблемы использования и охраны природных ресурсов Центральной Сибири. Красноярск: КНИИГиМС, 2007. Вып. 9. С. 106–108.
- [2] Гладышев М.И., Москвичева (Андрианова) А.В. Байкальские вселенцы заняли доминирующее положение в бентофауне верхнего Енисея // ДАН. 2002. Т. 383, № 4. С. 568-570.
- [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.
- [4] Дгебуадзе Ю.Ю., Петросян В.Г., Бессонов С.А., Дергунова Н.Н., Ижевский С.С., Масляков В.Ю., Морозова О.В., Царевская Н.Г. Общая концепция создания проблемно-ориентированного интернет-портала по инвазиям чужеродных видов в Российской Федерации // Российский Журнал Биологических инвазий. 2008. № 2. С. 9-21.
- [5] Грезе В.Н. Кормовые ресурсы рыб реки Енисей и их использование. М.: Пищепромиздат, 1957. Т. 41. 236 с.
- [6] Андрианова А.В., Якубайлик О.Э., Шулелина С.П. Использование ГИС-технологий в анализе пространственно-временной динамики байкальских амфипод в р. Енисей // XI съезд гидробиологического общества при РАН. Красноярск, СФУ, 22-26 сентября 2014. С. 17-18.
- [7] Андрианова А.В., Якубайлик О.Э. Геоинформационная веб-система для обеспечения гидробиологического мониторинга на примере зообентоса р. Енисей // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21, № 1. С. 5-14.
- [8] Yakubailik O., Kadochnikov A., Tokarev A. Applied software tools and services for rapid Web GIS development // Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, Vol I (SGEM 2015). 2015. V. 1. Is. 2. P. 487–496. DOI: 10.5593/SGEM2015/B21/S8.060.
- [9] Andrianova A., Shaparev N., Yakubailik O. Geoinformation support and web technologies for problems of hydrobiological monitoring of Yenisei river // MATEC Web of Conferences 79, 01056 (2016). DOI: 10.1051/mateconf/20167901056.
- [10] Кадочников А.А., Якубайлик О.Э. Сервис-ориентированные веб-системы для обработки геопрограммных данных // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2015. Т. 13, № 1. С. 37-45.