УДК 51.2: 504.455+502.33+504.4.062.2
DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-3-58-70

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕГРИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКОСИСТЕМОЙ И ВОДОСБОРНОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ ОЗЕРА СЕВАН: МОДЕЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ

© 2017 г. В.В. Селютин¹, К.Э. Месропян², Р.М. Арутюнян³, Б.К. Габриэлян⁴

Аннотация. Статья подготовлена в рамках исследования, направленного на решение научно-практической проблемы формирования основ интегрированного, в том числе антикризисного, управления крупными природно-хозяйственными системами озерного типа. Прикладным аспектом данной проблематики выступает разработка методологических основ управления водопользованием в бассейне озера Севан. Дана оценка экономико-экологических факторов развития природно-хозяйственных комплексов в бассейне озера Севан. Сформулированы принципы разработки организационных основ интегрированного природопользования и природоохранной деятельности в регионе. Предложены механизмы управления в регионе бассейна озера Севан в обобщенной модельной форме в рамках концепции «движущие силы, давление, состояние, воздействие, последствия, восстановление». Разработана модель «медленного» круговорота, ориентированная на масштабы времени, характерные для процесса формирования биогенного баланса Севана. Проведены ретроспективные и прогностические эксперименты с моделью, согласно которым величина первичной продукции после прохождения максимума имеет тенденцию к снижению, а установившийся уровень первичной продукции примерно в 2,6 раза превышает ее величину в 1931 г. при условии сохранения существующей биогенной нагрузки. Поднятие уровня воды снижает риск гипоксии и ускоряет темпы уменьшения первичной продукции.

Ключевые слова: озеро Севан, гидроэкосистема, водосбор, антропогенное воздействие, интегрированное управление, математическая модель.

PROBLEMS OF INTEGRATED MANAGEMENT OF THE ECOSYSTEM AND CATCHMENT AREA OF LAKE SEVAN: MODEL APPROACHES

V.V. Selyutin¹, K.E. Mesropyan², R.M. Arutyunyan³, B.K. Gabrielyan⁴

Abstract. The article is prepared at the framework of study aimed for solving the scientific and practical problem of forming the foundations of integrated management of lake type large natural-economic systems. An applied aspect of this problem is the development of methodological bases for water management in the basin of Lake Sevan. The assessment of economic and ecological factors of development of natural-economic complexes in the basin of Lake Sevan is given. The development principles of organizational bases of integrated nature management and nature protection activity in the region are formulated. Control mechanisms in the region of Lake Sevan basin are proposed in a generalized model form within the framework of the concept “driving forces, pressure, state, impact, responses, recovery”. A “slow” cycle model oriented to the time scales which are characteristic for the process of forming the biogenic balance of Lake Sevan was developed. Retrospective and predictive experiments were provided with the model according to which the value of primary production after

¹ Южный федеральный университет (Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, e-mail: selyutin@sfedu.ru

² Южный научный центр Российской академии наук (Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41

³ Ереванский государственный университет (Yerevan State University, Republic of Armenia), Республика Армения, 0025, г. Ереван, ул. А. Манукяна, 1

⁴ Институт гидроэкологии и ихтиологии Научного центра зоологии и гидроэкологии НАН Республики Армения (Institute of Hydroecology and Ichthyology of the Scientific Center of Zoology and Hydroecology of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, Republic of Armenia), Республика Армения, 0044, г. Ереван, ул. Маршала Баграмяна, 24Д

the passage of the maximum tends to decrease, and the established level of primary production is approximately 2.6 times greater than its value in 1931 providing that the existing biogenic load did not change. Rising of water level reduces the risk of hypoxia and accelerates the rate of decrease in primary production.

Keywords: Lake Sevan, hydroecosystem, catchment, anthropogenic impact, integrated management, mathematical model.

ВВЕДЕНИЕ

Озеро Севан – крупнейший высокогорный водоем Северного Кавказа и стратегически значимый источник пресной воды в Республике Армения. Экономика страны опирается на интенсивное природопользование, обеспечивающее развитие сельского хозяйства, рыболовства, химической, металлургической и горнодобывающей промышленности, теплоэнергетики, туризма и рекреации. Регион бассейна озера Севан в настоящее время является экологически неблагоприятным [1; 2]. Исследователи выделяют наиболее существенные экологические проблемы, связанные с высоким уровнем антропогенной нагрузки на водные ресурсы: нарушение биотического баланса, исчезновение естественных водоемов в бассейне озера, изменение береговой линии, сброс вредных веществ в озеро, эрозия почв, воздействие глобальных изменений климата, сокращение биоразнообразия [2]. В отношении регулирования уровня озера и водопотребления в республике ведутся общественные обсуждения. На социально-экономическое развитие территорий бассейна озера Севан влияет наличие эколого-экономической конфликтности, для снижения которой целесообразно применять систему интегрированного управления водными ресурсами (ИУВР) и системный подход DPSIRR (driving forces, pressures, state, impact, response, recovery, то есть движущие силы, давление, состояние, воздействие, отклик (последствия), восстановление) [3]. Проблема сохранения озера Севан с исследовательской точки зрения носит системный характер, что позволяет использовать аппарат эколого-экономического моделирования для решения трех задач:

- 1) прогноз экологического состояния озера в зависимости от изменения уровня воды и внешних потоков веществ;
- 2) оценка оптимальной величины поднятия уровня воды;
- 3) выбор оптимального управления уровнем (в режиме поднятия).

Первая задача является ключевой и наиболее сложной. Сложность ее определяется междисциплинарным характером оценки состояния водных экосистем (у гидрохимиков, гидробиологов, ихтиологов и гигиенистов существуют различные, нечетко согласующиеся шкалы и критерии оценок), слабостью информационной базы (особенно в довоенный период), относительным несовершенством существующих методов экологического моделирования и прогнозирования.

Вторая задача требует определенного согласования экономических и экологических критериев. Поскольку поднятие уровня воды влечет рост стоимости соответствующих работ, а улучшение экологического состояния имеет свои пределы, то, очевидно, существует некоторая оптимальная (в экономическом смысле) отметка уровня. В первом приближении можно считать, что оптимальным уровнем является тот, превышение которого не дает ощутимого улучшения выбранного критерия экологического состояния.

Третья задача иерархически связана с двумя предыдущими и заключается в конкретизации мероприятий, влияющих на состояние озера (переброска вод, уменьшение попусков, очистка сточных вод, обводный коллектор и т.д.), и их сбалансированном сочетании.

В статье приведено описание сложившегося в регионе бассейна озера Севан водопользования, рассмотрена система ИУВР, обсуждены задачи эколого-экономического моделирования. Для реализации интегрированного подхода к управлению природно-хозяйственными системами озерного типа предложена концептуальная интегративная модель DPSIRR, названная по наименованию лежащей в ее основе подхода и отражающая вопросы водопользования в прибрежной зоне озера Севан. В рамках концептуальной модели предложена модель формирования трофического статуса озера. Представленная работа подготовлена в рамках научного проекта, целью которого является формирование интегрированной системы управления природопользованием для обеспечения экономико-экологической безопасности в регионе бассейна озера Севан.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе использованы методы математического моделирования и системный подход в рамках концептуальной модели [3]. Исследование базируется на данных, собранных и обобщенных в работах [4; 5], а также на материалах натурных наблюдений Института гидроэкологии и ихтиологии Научного центра зоологии и гидроэкологии НАН Республики Армения.

СОВРЕМЕННАЯ СИТУАЦИЯ В СФЕРЕ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ И ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ В РАМКАХ ИУВР

На социально-экономическое развитие территорий бассейна озера Севан влияет наличие эколого-экономической конфликтности, для снижения которой целесообразно применять систему интегрированного управления. Управление крупными природно-хозяйственными системами озерного типа в рамках упомянутой системы предполагает три компонента: интегрированное управление водными ресурсами (ИУВР), управление земельными ресурсами и управление природопользованием в целом, учитывающее особенности первых двух компонентов. В основе ИУВР лежат Дублинские принципы 1992 г.: водные ресурсы не бесконечны, и вода – основа жизни; развитие должно равномерно распределяться между теми, кто использует и теми, кто планирует и принимает решения; вода имеет экономическую стоимость и должна восприниматься как экономическое благо.

В концепции ИУВР интеграция предполагается в двух качествах: 1) интеграция водных ресурсов водоема и его бассейна (поверхностные, подземные воды и ресурсы возвратных вод); 2) интеграция интересов, целью которой является понимание и достижение интересов других лиц. ИУВР ориентировано на управление ресурсами по бассейнам, что реализует интеграцию бассейновых систем в управлении. Управление природопользованием и земельными ресурсами в качестве основного вектора должно иметь вектор, задаваемый задачами ИУВР. Таким образом, изучение проблем озера и его бассейна в рамках системного подхода проводится путем рассмотрения единого целого комплекса «озеро – водосбор», что определяет соответствующие задачи моделирования и управления.

Для изучения проблемы управления экосистемами озерного типа дополним общепринятые принципы ИУВР-принципами учета фактора времени и неопределенности в управлении. Для реализации данных принципов необходим учет долгосрочных взаимодействий в стратегическом планировании, в том числе:

- конкретизация целей устойчивого развития;
- сохранение биоразнообразия в бассейне озера;
- учет связанности природных систем и систем, создаваемых человеком (посредством цепочки DPSIRR);
- управление, опирающееся на стратегическое планирование;
- выделение приоритетов среди основных типов природопользования в системе стратегического планирования.

Для управления, ориентированного на ключевые индикаторы состояния экосистемы озера (уровень воды, качество вод, вылов рыбы, численность популяций (биоразнообразие)), необходима генерация и своевременное применение знаний об экосистеме с внедрением принципа экологизации в систему планирования. При этом должна использоваться практика совместного принятия решений с организацией рабочих групп и применением многокритериальных методов принятия решений. Реализация стратегических планов возможна при выполнении регулярного контроля (экологический мониторинг водных объектов и прибрежных зон, социально-экономический мониторинг) и отражении в планировании параметров, требующих пересмотра по результатам проводимого мониторинга.

В настоящее время в бассейне озера Севан присутствуют следующие природно-хозяйственные комплексы: рыбоводческие хозяйства, рыболовные хозяйства, гидроэлектростанции, сельскохозяйственные организации, рекреационные комплексы, фермерские хозяйства, домашние хозяйства. Система водопользования в регионе бассейна озера Севан включает в себя использование водных ресурсов: а) с забором водных ресурсов при условии возврата воды в водные объекты; б) с забором воды без ее возврата; в) без забора водных ресурсов из водных объектов. При этом в данном регионе сложились следующие особенности природопользования:

- 1) наличие хозяйственных объектов в водоохранной зоне и на эрозионно-опасных склонах: размещение промышленных предприятий, распашка земель под пастбища или посевные угодья, застройка, выпас скота;

- 2) эксплуатация гидроэнергетических комплексов;
- 3) эксплуатация ирригационных комплексов;
- 4) интродукция гидробионтов;
- 5) развитие аквакультуры;
- 6) развитие рекреационных зон и рост туризма.

Эколого-экономические конфликты в бассейне озера Севан разделяются на два основных типа. Первый тип представляют наиболее очевидные при постоянном экологическом мониторинге конфликты между нормативным и фактическим состоянием окружающей среды: сброс стоков в водные объекты, загрязнение отходами, эвтрофирование, абразия берегов и т.п. Конфликты второго типа менее явные, требующие анализа экономико-экологической ситуации (конфликты, связанные с различными целями землепользования и водопользования).

Неблагоприятные изменения в экосистеме Севана, выражающиеся прежде всего в массовом цветении планктонных водорослей, появлении дефицита кислорода, резком снижении запасов севанской форели, а также в ухудшении ряда показателей качества воды, естественно связывать со значительным (до 20 м) понижением уровня озера. Как известно, это снижение было вызвано осуществленным с середины 30-х гг. XX века спуском части озерных вод в р. Раздан. Следует отметить, что деградация Севана была сознательно запрограммирована, так как конечной целью спуска являлось уменьшение площади озера (полная ликвидация мелководной части – Большого Севана), и, как следствие, увеличение коэффициента водоотдачи водосбора (большая часть притока в озеро испарялась вследствие превышения испарения над осадками). Таким образом, в момент принятия решения о спуске доминировала водохозяйственная точка зрения. Спуск был рассчитан на достаточно длительный период, с тем чтобы с максимальной пользой расходовать дополнительную воду на нужды гидроэнергетики и орошения. Однако, во-первых, в силу ряда субъективных причин спуск производился чрезвычайно высокими темпами (до 1,3 м/год), что значительно снизило эффективность использования разданского стока; во-вторых, благодаря росту общественного самосознания и экологизации экономической политики возобладало единственно правильное отношение к Севану как к уникальному высокогорному озеру, хранителю чистой пресной воды, жемчужине Армении, а не как к резервуару-испарителю. Благодаря принятым мерам – переброске части стока из бассейна Аракса и снижению попусков в Раздан –

в настоящее время удалось стабилизировать и даже несколько повысить уровень воды в озере.

Однако было бы неправильным сводить севанскую проблему только к вопросам регулирования стока и уровня воды. Следует считаться с тем, что в последние десятилетия стали ощутимы и другие виды антропогенного воздействия, в первую очередь поступление биогенных веществ и поллютантов как с водосбором, так и из атмосферы.

Предпринимаемые ранее меры обосновывались исследованиями комплексного характера, однако не проводилась оценка эколого-экономической конфликтности, слабо учитывалась степень антропогенного воздействия на окружающую среду. Мероприятия, направленные на выход из кризисного состояния, заключались в следующем: подъем уровня воды в озере, уменьшение потерь воды, снижение поступления загрязняющих веществ в озеро и улучшение качества вод, восстановление биоразнообразия, в частности местной ихтиофауны (разработка регламента промыслового рыболовства), запрещение строительства малых ГЭС на реках бассейна, охрана почв, расширение и усовершенствование системы экологического мониторинга озера и его бассейна [5]. Необходимо было опираться на анализ взаимосвязей экосистемы озера и экосистем бассейна, их взаимодействия с хозяйственными комплексами, при этом имело место отсутствие должного уровня координации различных ведомств и служб.

За последние 25 лет не раз были сделаны попытки создания комплексной детализированной модели озера Севан, но по ряду причин они не увенчались успехом. Во многом это связано с тем, что степень изученности отдельных звеньев экосистемы сильно различается, а ряды наблюдений носят нерегулярный характер как во времени, так и в пространстве, что не позволяет идентифицировать и верифицировать модели с достаточной степенью надежности. Заявленные в рамках комплексной экспедиции 2005–2009 гг. исследования основных закономерностей биогеохимического круговорота веществ, структурных и функциональных изменений в трофических цепях, включая изучение пространственного распределения и баланса различных форм азота и фосфора, первичной продукции и энергетического (биотического) баланса популяций, к сожалению, так и не были осуществлены [6].

Представляется, что более реалистичный подход состоит в создании системы согласованных взаимосвязанных моделей, отражающих отдель-

Рис. 1. Интегрированное управление водопользованием в бассейне озера Севан
Fig. 1. Integrated management of water using in the basin of Lake Sevan

ные аспекты функционирования экосистемы озера и учитывающих как физико-химические и биологические особенности абиотических и биотических компонентов экосистемы, так и различие временных и пространственных масштабов процессов. В конечном итоге результатом системных исследований в целях интегрированного управления бассейном озера Севан и восстановления его экосистемы должно стать создание детализированной компьютерной модели системы «озеро – водосбор», аналогично тому, как, например, описано в работах [7; 8].

ИНТЕГРАТИВНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ

Для реализации интегрированного подхода к управлению природно-хозяйственными системами озерного типа предлагается интегративная концептуальная модель DPSIRR, реализующая модели и механизмы использования водных ресурсов в рамках хозяйственных комплексов в прибрежной зоне озера Севан.

Исходный вид концептуальной модели представлен схематически на рисунке 1. Модель описывает взаимодействие системы управления и социо-эколого-экономических систем озера и территории его водосбора при водопользовании. Стрелками на схеме обозначены отношения между компонентами. Воздействие конкретных видов хозяйственной деятельности представлено в модели как основной источник развития эколого-экономических конфликтов и описано в блоке «движущие силы». Перечень водных и природных ресурсов, подверженных влиянию таких воздействий, указан в блоке «давление». В следующем блоке, «состояние», определены основные элементы экосистем озера и его бассейна, для которых требуется мониторинг текущего состояния и сбор ретроспективных данных, необходимых для проведения анализа, синтеза и, по возможности, прогноза влияния давления на экосистемы. В блоке «воздействие» перечислены последствия изменения компонентов экосистем, которые приводят к ухудшению эколого-экономи-

ческой ситуации. Далее в блоке «отклик» сформированы институциональные механизмы снижения эколого-экономической конфликтности, направленные на установление баланса в рамках интегрированного управления, сформулированы эффекты для природы, общества и экономики региона, имеющие обратные связи со всеми компонентами системы. В блоке «восстановление» заданы технические и технологические решения, влияющие на компоненты «давление» и «состояние».

В представленной модели экосистема озера является центральным объектом управления, поэтому для связи компонент «движущие факторы – давление – состояние – воздействие – отклики – восстановление» желательно располагать математической моделью, которая позволила бы оценить последствия тех или иных управляющих воздействий как для отдельных звеньев экосистемы, так и для озера в целом. Входные для экосистемы озера потоки вещества формируются на его водосборе, в связи с чем моделирование процессов на водосборе является самостоятельной задачей.

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ОЗЕРА

Несмотря на значительное количество исследований, пик которых пришелся на 70–80-е гг. прошлого века, понятие трофического статуса (состояния) водоема до сих пор не имеет достаточно четкого определения. В индексы трофического состояния, предлагаемые различными авторами, входят такие показатели, как концентрация общего азота и фосфора в водоеме, концентрация хлорофилла, величина годовой первичной продукции, прозрачность по диску Секки, глубина водоема, проточность, биогенная нагрузка, коэффициент удержания, потребление кислорода в гипolimнионе и т.д. [9–17].

На наш взгляд, целесообразно четко выделять группу *установочных*, или *входных*, параметров, которые могут быть использованы для прогнозирования, и группу *показателей состояния*, непосредственно характеризующих трофический статус водоема постфактум (рис. 2). Во второй группе наиболее информативными являются два показателя – первичная продукция и концентрация кислорода в гипolimнионе. Эти показатели мы и будем рассматривать как определяющие трофический статус Севана.

Предлагаемая модель базируется на следующих теоретических предпосылках:

Рис. 2. Схема формирования трофического статуса озера. $C_{\text{орг}}$ – органический углерод; БПК – биологическое потребление кислорода; ХПК – химическое потребление кислорода

Fig. 2. Lake trophic status formation scheme. $C_{\text{орг}}$ – organic carbon; БПК – biological oxygen demand; ХПК – chemical oxygen demand

1. Биологическая продуктивность водоемов (более определенно – первичная продукция) определяется совокупностью продукционно-деструкционных процессов, образующих биотический круговорот.

2. Энергетической основой биотического круговорота являются процессы фотосинтеза и окисления (минерализации), вещественной основой – круговорот биогенных элементов, скорость которого определяется по лимитирующему биогенному элементу (как правило, азоту или фосфору).

3. Модельное описание системы базируется на совместном применении балансового принципа и кибернетического подхода, что выражается в компартиментализации модели, то есть в представлении озерного круговорота в виде

$$\frac{dx}{dt} = (P - P^T)e, \quad (1)$$

где $x \in R_+^N$ – вектор состояния экосистемы, $P = (p_{ij})$, $i, j = \overline{0, N}$ – матрица потоков вещества между рассматриваемыми переменными состояниями (компартаментами), p_{i0}, p_{0j} – обменные потоки с внешней средой, $e = (1, 1, \dots, 1)^T$ – единичный вектор-столбец, T – символ транспонирования.

4. Определяющим фактором при формировании вектора состояния является учет временного масштаба рассматриваемых явлений. Для экосистемы озера Севан можно выделить три характерных масштаба времени:

- первичного круговорота ($T_{\text{пк}} < 1$ год),
- спуска и подъема уровня ($T_c \sim 10$ лет),
- внешнего водообмена ($T_0 \sim 50$ лет).

Соответственно, выделяются «быстрые» и «медленные» переменные. К первым относятся фито-бактерио- и зоопланктон, лабильные органические и минеральные соединения. В качестве «медленных» следует рассматривать переменные, мало изменяющиеся в ходе годового лимнического цикла. К таковым относятся стойкие фракции органического вещества (водный гумус), запасы вещества в донных отложениях, а также агрегированная переменная, объединяющая все «быстрые» компоненты.

5. Вводя малый параметр $\mu = T_{\text{пк}}/T_0$, рассмотрим систему (2):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f(x, y, t, \mu t) + \mu g(x, y, t, \mu t), \\ \frac{dy}{dt} &= \mu h(x, y, t, \mu t), \end{aligned} \quad (2)$$

где x – вектор «быстрых» переменных, y – вектор «медленных» переменных.

В силу квазизамкнутости озерного биотического круговорота представление (2) всегда можно выбрать так, что $\sum f_i = 0$. Проводя операцию усреднения и используя метод «замороженных» коэффициентов, получаем приближенное решение системы «быстрого» круговорота $x = x(q, y, \tau)$ и далее редуцированную модель «медленных» переменных (3):

$$\begin{aligned} \frac{dq}{d\tau} &= \bar{G}(\bar{x}(q, y, \tau), y, \tau), \\ \frac{dy}{d\tau} &= \bar{h}(\bar{x}(q, y, \tau), y, \tau), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{G} = \Sigma g_i(x, y, \tau)$, $q = \Sigma x_i$, $\tau = \mu t$.

С учетом пп. 1–5 предлагается редуцированная модель динамики фосфора, азота и первичной продукции в озере Севан.

Вектор состояния модели включает следующий набор «медленных» переменных: Q_N , Q_P – интегральные переменные, объединяющие «быстрые» компоненты, содержащие соединения азота и фосфора; Y – водный гумус, выраженный в $C_{\text{орг}}$; B_N , B_P – запасы соединений азота и фосфора в активном слое донных отложений.

Процессы, учитываемые в модели: поступление вещества с речным притоком и атмосферными осадками, сток вещества из озера через р. Раздан, азотфиксация и денитрификация, автохтонное образование органического вещества, оседание органического вещества на дно озера, минерализация, диффузия (ресуспензия) минеральных веществ из

донных отложений в воду, безвозвратное захоронение азота и фосфора.

Уравнения модели:

$$\begin{aligned} \frac{dB_N}{dt} &= \sigma_N P_N - \rho_N B_N, \\ \frac{dB_P}{dt} &= \sigma_P P_P - \rho_P B_P, \\ \frac{dQ_N}{dt} &= \frac{1}{H} (L_N - \frac{dB_N}{dt} + U_1 - U_2) - \\ &\quad - (v_1 - v_2) Q_N - \frac{1}{H} * \frac{1}{n_N} (\eta + \xi_N) P_C + kY \frac{1}{n_N}, \\ \frac{dQ_P}{dt} &= \frac{1}{H} (L_P - \frac{dB_P}{dt}) - (v_1 - v_2) Q_P - \\ &\quad - \frac{1}{H} * \frac{1}{n_P} (\eta + \xi_P) P_C + kY \frac{1}{n_P}, \\ \frac{dY}{dt} &= \frac{1}{H} L_Y - (v_1 - v_2) Y + \frac{1}{H} \eta P_C - kY, \end{aligned} \quad (4)$$

где H – средняя глубина озера; L_N , L_P , L_Y – биогенная нагрузка на озеро (соответственно N, P, C); $v_1 = V_1/V$, $v_2 = V_2/V$ – проточность; V_1 – объем воды, поступающий в озеро за год (речной приток плюс осадки); V_2 – объем воды, испаряющейся с поверхности озера за год; V – объем озера; η – доля стойкой фракции в продуцируемом органическом веществе (ОВ); P_C , P_N , P_P – первичная продукция, выраженная в единицах углерода (C), азота (N), фосфора (P); k – скорость минерализации ОВ; U_1 , U_2 – потоки азотфиксации и денитрификации;

$$\xi_N = \frac{\xi I_N}{r_N}, \quad \xi_P = \frac{\xi I_P}{r_P},$$

ξ – доля первичной продукции, захороняемая в донных отложениях;

$$\sigma_N = \frac{\sigma I_N}{m_N}, \quad \sigma_P = \frac{\sigma I_P}{m_P},$$

σ – скорость седиментации; p_N , p_P – скорость ресуспензии N и P; n_N , n_P – коэффициенты, равные отношению C : N, C : P в стойком ОВ; r_N , r_P – коэффициенты, равные отношению C : N, C : P в захороняемом веществе; m_N , m_P – коэффициенты, равные отношению C : N, C : P в оседающем седименте; I_N , I_P – коэффициенты, равные отношению C : N, C : P в синтезируемом ОВ.

Формула для первичной продукции отражает эффект лимитирования:

$$P_C = \min \left\{ (Q_N - Q_N^*) I_N c_N H_0, (Q_P - Q_P^*) I_P c_P H_0 \right\}, \quad (5)$$

где Q_N^* , Q_P^* – минимальные концентрации азота и фосфора; C_N , C_P – скорости круговорота азота и фосфора; H_0 – толщина продукционного слоя.

В таблице 1 приведены численные значения коэффициентов модели. При идентификации модельных параметров, задании начальных условий и входных воздействий были использованы работы

Таблица 1. Коэффициенты модели
Table 1. Model coefficients

Коэффициент Coefficient	Значение Value	Размерность Unit
η	0,01–0,05	б/п dimensionless
k	0,1	год ⁻¹ year ⁻¹
ξ	0,05	б/п dimensionless
ξ_N	0,034	б/п dimensionless
ξ_P	0,031	б/п dimensionless
n_N	15–20	мгС/мгN mgC/mgN
n_P	100–200	мгС/мгP mgC/mgP
m_N, l_N, r_N	7	мгС/мгN mgC/mgN
m_P, l_P, r_P	49	мгС/мгP mgC/mgP
σ	0,4	б/п dimensionless
ρ_N, ρ_P	0,1–0,5	год ⁻¹ year ⁻¹
Q_N^*	10	мгN/м ³ mgN/m ³
Q_P^*	1	мгP/м ³ mgP/m ³
c_N, c_P	10	год ⁻¹ year ⁻¹
H_0	15	м m
Q_N	129	мгN/м ³ mgN/m ³
O_P	320	мгP/м ³ mgP/m ³
Y	2100	мгC/м ³ mgC/m ³
B_N	12900	мгN/м ³ mgN/m ³
B_P	1837	мгP/м ³ mgP/m ³

[18–22], в которых содержится информация о состоянии озера в 70–80-е гг. прошлого века.

Ретроспективные модельные расчеты показали «всплеск» продукции, который обусловлен следующими факторами: изменением входных концентраций биогенов, увеличением выхода минеральных форм из донных отложений, проявлением динамического эффекта (уменьшение объема озера в результате спуска), увеличением проточности озера. Далее первичная продукция снижается. В результате счета на установление получено предельное значение первичной продукции, приблизительно в 2,6 раза превышающее ее уровень в допусковой период. Это значение определяется интенсивностью биогенной нагрузки на озеро (в первую очередь фосфором как лимитирующим элементом), а также проточностью озера. Различные значения проточности могут достигаться при использовании различных способов подъема уровня (путем дополнительной переборки вод или сокращения попусков в Раздан), а также при их сочетании.

Расчеты первичной продукции были проведены при различных сценариях управления (рис. 3). Цифрами обозначены кривые динамики первичной продукции при: 1 – подъеме уровня воды в озере на 3 м путем дополнительной переборки (рост концентраций биогенов в речном притоке с 1970 г.); 2 – подъеме уровня воды на 3 м путем уменьшения попусков из озера (концентрации биогенов в речном притоке с 1985 по 2000 г. уменьшаются на 10 %); 3 – подъеме уровня воды на 3 м путем переборки (рост концентраций биогенов в речном притоке с 1960 г.). Все три сценария дают схожую картину динамики, однако сценарий 2 обеспечивает меньшее предельное значение первичной продукции.

Отметим, что аналогичный механизм ускоренной реакции крупных озер на изменение биогенной нагрузки по сравнению с характерным временем внешнего водообмена благодаря вовлечению в круговорот донных отложений исследован аналитически в работе [23] с использованием модели внешнего биогенного баланса.

Несмотря на простоту, модель (4) учитывает практически все перечисленные в работе [5] факторы, повлиявшие на эвтрофирование Севана, такие как вовлечение в круговорот азота, накопленного ранее в донных отложениях; нарушение равновесия в системе «вода – дно» (многократное превышение поступления азота из донных отложений по сравнению с его седиментацией и превышение седиментации фосфора над его высвобождением из донных отложений); поступление в воду значитель-

Рис. 3. Динамика первичной продукции (P_c) озера при различных сценариях управления: а – средняя глубина озера, м; б – годовая первичная продукция, $гС/м^2$. Цифрами обозначены кривые динамики первичной продукции при: 1 – подъеме уровня воды в озере на 3 м путем дополнительной переборки (рост концентраций биогенов в речном притоке с 1970 г.); 2 – подъеме уровня воды на 3 м путем уменьшения попусков из озера (концентрации биогенов в речном притоке с 1985 по 2000 г. уменьшаются на 10 %); 3 – подъеме уровня воды на 3 м путем переборки воды из Арпы (при росте концентраций биогенов в речном притоке с 1960 г.)

Fig. 3. Primary production dynamics (P_c) under different management scenarios: а – mean depth of the lake, m; б – annual primary production, $гС/м^2$. The figures indicate the curves of the dynamics of primary production at: 1 – rise of water level in the lake 3 m up by additional transfer (the increase in the concentrations of nutrients in the river tributary since 1970); 2 – rise of water level 3 m up by reducing releases from the lake (the concentration of nutrients in the river tributary decreases by 10 % from 1985 to 2000); 3 – rise of water level 3 m up by transfer of Arpa River water (with the increase in the concentrations of nutrients in the river tributary since 1960)

ного количества азота в результате гибели и последующего разложения макрофитов при снижении уровня воды; дополнительное поступление азота в озеро вследствие массового развития азотфиксирующих сине-зеленых водорослей (цианобактерий); рост поступления азота с водосбора в результате хозяйственной деятельности.

Начиная с 2002 г. уровень озера стал подниматься благодаря прекращению попусков в энергетических целях, поступлению вод р. Арпа через тоннель Арпа – Севан, а также полноводности ряда лет. Согласно экспедиционным исследованиям 2010–2011 гг. Института гидроэкологии и ихтиологии Научного центра зоологии и гидроэкологии НАН Республики Армения [5] в результате подъема уровня озера в экосистеме наблюдаются положительные тенденции, в частности увеличение прозрачности, что косвенно свидетельствует о снижении концентрации фитопланктона и первичной продукции. Так, летом 2011 г. прозрачность воды в Большом

Севане достигла 10,3 м, а в Малом Севане – 12 м. Указанные величины не сравнимы с показателями периода высокой «трофности» озера (около 3 м) и приближаются к показателям прозрачности вод озера в допускном периоде. К сожалению, как уже отмечалось выше, систематических данных о первичной продукции и деструкции органического вещества в озере недостаточно.

В таблице 2 приведены основные показатели состояния озера в допускном периоде, в период максимального спуска и в период подъема уровня воды.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МОРФОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ОЗЕРА НА КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ

Общее представление об изменении морфометрии озера в связи с понижением уровня дает таблица 3.

Таблица 2. Изменение некоторых лимнологических показателей озера Севан в 1930–2010 гг. (по данным Института гидроэкологии и иктиологии Научного центра зоологии и гидроэкологии НАН Республики Армения)

Table 2. Change of some limnological indicators of Lake Sevan in 1930–2010 years (according to the data of Institute of Hydroecology and Ichthyology of the Scientific Center of Zoology and Hydroecology of the National Academy of Sciences of Armenia)

Показатель Indicator	Единица измерения / Unit	1930– 1935	1978– 1982	1985– 1990	1995– 1999	2001– 2003	2005– 2010
Снижение уровня воды Decrease of water level	м m	0,0	18,8	17,6	19,8	20,2	16,8
Средняя глубина Average depth	м m	41,2	28,0	28,7	27,0	26,8	30,1
Объем озера Lake volume	км ³ km ³	58,5	35,3	37,4	34,0	33,4	36,04
Прозрачность Transparency	м m	14,3	3,0	5,6	2,1	3,0	6,0
Азот общий Total nitrogen	г/м ³ g/m ³	0,07	2,6	0,46	2,64	0,76	0,25
Фосфор общий Total phosphorus	г/м ³ g/m ³	0,37	0,19	0,04	0,06	0,09	–
Первичная продукция Primary production	гС/м ² год gC/m ² year	100	684	350	699	–	–

При изменении уровня воды в Севане происходит перераспределение доли $\delta_h(z^*, \Delta z)$ площадей участков дна, расположенных на определенной глубине, по отношению к площади поверхности озера. Вычисления перераспределения проводятся по формуле:

$$\delta_h(z^*, \Delta z) = [S(z^* - \Delta z) - S(z^* + \Delta z)] / S_h(0), \quad (6)$$

где z^* – центр рассматриваемой зоны глубин; Δz – размах зоны; $S(z)$ – гипсографическая функция; $S_h(0)$ – площадь поверхности озера при данном уровне воды h .

Как известно, в наибольшей степени спуск уровня на 19 м повлиял на морфометрию Большого Севана [24]. Этот факт четко диагностируется формулой (6). Представляется небезынтесным анализ влияния изменения морфометрии на кислородный режим озера. Согласно натурным наблюдениям, явление гипоксии в озере Севан наблюдается на определенных, так называемых опасных, глубинах – 20–30 м от поверхности.

Важно отметить, что оценка изменения морфометрии, получаемая по формуле (6), является достаточно информативным показателем, так как неявно учитывает ряд гидрологических, биохимических и гидродинамических характеристик, присущих озеру. С помощью этой оценки (параметры $z^* = 25$ м, $\Delta z = 5$ м) можно выяснить, как изменяется доля

«опасных» глубин в зависимости от уровня воды в озере (рис. 4). Из графиков видно, что понижение уровня по сравнению с допускоским почти на 20 м привело в Большом Севане к 8-кратному увеличению зоны «опасных» глубин (20–30 м). В Малом Севане это изменение незначительно, причем следует обратить внимание на тот факт, что после максимального понижения воды доля таких глубин в Малом Севане стала такой, какой была в Большом Севане до спуска (0,1).

Таблица 3. Морфометрические характеристики озера Севан до и после спуска [5]

Table 3. Morphometric characteristics of Lake Sevan before and after discharge [5]

Характеристика Specification	До спуска / Before discharge	После спуска (1995) After discharge (1995)
Наибольшая глубина (м) Maximum depth (m)	98,7	79,7 (–19 %)
Средняя глубина (м) Average depth (m)	41,3	26,8 (–35 %)
Площадь поверхности (км ²) Surface area (km ²)	1416,2	1238,8 (–12,5 %)
Объем (км ³) Volume (km ³)	58,48	33,20 (–43,2 %)
Уровень воды (м) Water level (m)	1915,97	1896,75 (–9,22 м)

При прочих равных условиях (продукции, температуре воды, характере водообмена и т.д.) только снижение уровня воды (на 20 м) приводит в Большом Севане к созданию явных предпосылок для ухудшения кислородного режима. Напротив, повышение уровня воды в озере будет сокращать долю «опасных» глубин в Большом Севане, и, следовательно, вести к снижению риска гипоксии (даже при неизменной первичной продукции озера).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Базирующаяся на системном подходе концептуальная модель DPSIRR описывает комплекс задач по стратегическому управлению водными ресурсами и развитию природно-хозяйственных систем, а также организационно-экономические способы интеграции водопользования в системе рационального природопользования.

По результатам проведенного междисциплинарного исследования выделены следующие направления интегрированного управления:

а) внедрение в систему управления водопользованием и землепользованием соответствующих стратегических планов;

б) создание концепции, включающей план мероприятий, направленных на достижение удовлетворительного уровня устойчивого развития территории в бассейне озера Севан;

в) проведение мониторинга для оценки эколого-экономической ситуации;

г) распространение знаний о состоянии озера и его водосбора.

Последнее из вышеперечисленных направлений получило развитие в деятельности неправительственной организации Армении «ЭкоЛур», на веб-сайте которой регулярно публикуют текущую информацию о состоянии Севана и прилегающих территорий [25].

Численные эксперименты с моделью «медленного» круговорота позволили сделать следующие выводы:

1. Причинами эвтрофирования озера Севан являются: быстрое по сравнению с характерным временем внешнего водообмена падение уровня воды; рост суммарного потока азота в озеро; изменение структуры глубин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петросян Р.А. 2013. Вопросы экономического развития, экологической экспертизы и эколого-экономического учета в Армении. В кн.: *Новые подходы в экономике и управлении: материалы III международной научно-практической*

Рис. 4. Зависимость относительной площади «опасных» глубин (20–30 м) от величины снижения уровня воды: а – Малый Севан; б – Большой Севан; вертикальная ось – доля акватории котловин озера, приходящаяся на «опасные» глубины; горизонтальная ось – величина снижения уровня воды (в метрах) по отношению к допусковому уровню

Fig. 4. Dependence of “dangerous” depths relative area (20–30 m) on the water level lowering value: а – Small Sevan; б – Large Sevan; vertical axis – fraction of lake hollows area, which fall on “dangerous” depths; horizontal axis – water level lowering value (in meter) relative to water level before discharge

2. Величина первичной продукции после прохождения максимума имеет тенденцию к снижению.

3. Поднятие уровня уменьшит долю «опасных» глубин, ускорит процесс снижения уровня первичной продукции.

4. Предельный (асимптотический) уровень первичной продукции примерно в 2,6 раза превышает ее величину в 1931 г. (при условии сохранения существующей биогенной нагрузки).

5. В силу неопределенности части исходной информации полученные количественные оценки имеют оценочный характер, однако качественное поведение модели (4) остается неизменным при вариации параметров.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках международного проекта № 15-55-05099 Арм_а «Научные основы интегрированного управления использованием природных ресурсов озера Севан».

конференции 15–16 сентября 2013 года. Прага, Vědecko vydavatelské centrum „Sociosféra-CZ“: 222–227.

2. Антипов А.Н., Семенов Ю.М., Элизбарашвили Н.К., Саядян О.Я., Мамедов Р.М. 2009. Ландшафтное планирование в Закавказье. *География и природные ресурсы*. 3: 135–143.

3. Feld C.K., Birk S., Bradley D.C., Hering D., Kail J., Marzin A., Melcher A., Nemitz D., Pedersen M.L., Pletterbauer F., Pont D., Verdonshot P.F.M., Friberg N. 2011. From Natural to Degraded Rivers and Back Again: A Test of Restoration Ecology Theory and Practice. *Advances in Ecological Research*. 44: 119–209. doi: 10.1016/B978-0-12-374794-5.00003-1
4. Матишов Г.Г., Селютин В.В., Месропян К.Э., Булышева Н.И., Шевердяев И.В., Арутюнян Р.М., Габриелян Б.К. 2016. Современное состояние и проблемы изучения озера Севан. *Наука Юга России*. 12(2): 43–52.
5. Интегральная оценка экологического состояния озера Севан (GEO-Lake Sevan). 2011. Ереван: Лусакн: 100 с.
6. Экология озера Севан в период повышения его уровня. Результаты исследований Российско-Армянской биологической экспедиции по гидроэкологическому обследованию озера Севан (Армения) (2005–2009 гг.). 2010. Махачкала: Наука ДНЦ: 348 с.
7. White J.D., Prochnow S.J., Filstrup C.T., Scott J.T., Byars B.W., Zygo-Flynn L. 2010. A combined watershed-water quality modeling analysis of the Lake Waco reservoir: I. Calibration and confirmation of predicted water quality. *Lake and Reservoir Management*. 26(2): 147–158. doi: 10.1080/07438141.2010.495315
8. White J.D., Prochnow S.J., Filstrup C.T., Byars B.W. 2010. A combined watershed-water quality modeling analysis of the Lake Waco reservoir: II. Watershed and reservoir management options and outcomes. *Lake and Reservoir Management*. 26(2): 159–167. doi: 10.1080/07438141.2010.495317
9. Shannon E.E., Brezonik P.L. 1972. Eutrophication analysis: A multivariate approach. *Journal of Sanitary Engineering Division. Proceedings ASCE*. 98: 37–58.
10. Carlson R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*. 22(2): 361–369.
11. Reckhow K. 1978. Lake quality discriminant analysis. *Journal of the American Water Resources Association*. 14(4): 856–876.
12. Yeasted J.R., Morel F.M.M. 1978. Empirical insights into response to nutrient loadings, with application to models of phosphorus in lakes. *Environmental Science and Technology*. 12(2): 195–201.
13. Ciecka J., Fabian R., Merilatt D. 1979. A statistical model for small lake water quality management. *Journal of the American Water Resources Association*. 15(5): 1318–1330.
14. Walker W.W., Jr. 1979. Use of hypolimnetic oxygen depletion rate as a trophic state index for lake. *Journal of the American Water Resources Association*. 15(6): 1463–1470.
15. Porcella D.B., Peterson S.A., Larsen D.P. 1980. Index to evaluate lake restoration. *Journal of Sanitary Engineering Division. Proceedings ASCE*. 106(6): 1151–1169.
16. Brown T., Simpson J. 2001. Determining the trophic state of your lake. *Watershed Protection Techniques*. 3(4): 771–781.
17. Cooke G.D., Welch E.B., Peterson S.A., Nichols S.A. 2005. *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*. Boca Raton-London – New York – Singapore, Taylor & Francis: 591 p.
18. Лятти С.Я. 1932. Материалы по исследованию озера Севан и его бассейна. Ч. 4, вып. 2. Гидрохимический очерк озера Севан. Закавказский Севанский Комитет: 36 с.
19. Оганесян Р.О., Парпаров А.С. 1983. Экологические аспекты севанской проблемы. *Труды Севанской гидробиологической станции*. 18: 5–13.
20. Парпаров А.С. 1983. Некоторые итоги изучения первичной продукции озера Севан. *Труды Севанской гидробиологической станции*. 18: 14–50.
21. Парпарова Р.М. 1985. Особенности круговорота фосфора в озере Севан на фоне изменений его гидрохимического режима в связи с антропогенным воздействием: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ростов н/Д: 24 с.
22. Оганесян Р.О. 1988. Антропогенное эвтрофирование озера Севан и пути предотвращения его отрицательных последствий: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: 48 с.
23. Katsev S. 2017. When large lakes respond fast: A parsimonious model for phosphorus dynamics. *Journal of Great Lakes Research*. 43: 199–204. doi: 10.1016/j.jglr.2016.10.012
24. Киреев И.А. 1933. Материалы по исследованию озера Севан и его бассейна. Ч. 5. Гидрографические работы на озере Севан. Л., Советский печатник: 132 с.
25. *EcoLur Network*. URL: www.ecolur.org (дата обращения: 20.09.2016).

REFERENCES

1. Petrosyan R.A. 2013. [On economic development, ecologic expertise, and ecological and economic accounting in Armenia]. In: *Novye podkhody v ekonomike i upravlenii: materialy III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 15–16 sentyabrya 2013 goda*. [New approaches in economics and management: Materials of the III International Scientific and Practical Conference (Prague, Czech Republic, 15–16 September 2013)]. Prague, Vědecko vydavatelské centrum „Sociosféra-CZ“: 222–227. (In Russian).
2. Antipov A.N., Semenov Yu.M., Elizbarashvili N.K., Sayadian O.Ya., Mamedov R.M. 2009. Landscape planning in the Transcaucasia. *Geography and Natural Resources*. 30(3): 285–293. doi: 10.1016/j.gnr.2009.09.014
3. Feld C.K., Birk S., Bradley D.C., Hering D., Kail J., Marzin A., Melcher A., Nemitz D., Pedersen M.L., Pletterbauer F., Pont D., Verdonshot P.F.M., Friberg N. 2011. From Natural to Degraded Rivers and Back Again: A Test of Restoration Ecology Theory and Practice. *Advances in Ecological Research*. 44: 119–209. doi: 10.1016/B978-0-12-374794-5.00003-1
4. Matishov G.G., Selyutin V.V., Mesropyan K.E., Bulysheva N.I., Sheverdyayev I.V., Aroutiounian R.M., Gabrielyan B.K. 2016. [Current state and problems of the study of Lake Sevan]. *Nauka Yuga Rossii*. 12(2): 43–52. (In Russian).
5. *Integral'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya ozera Sevan*. [Integrated assessment of Lake Sevan environmental conditions (GEO-Lake Sevan)]. 2011. Yerevan, Lusakn: 100 p. (In Russian).
6. *Ekologiya ozera Sevan v period povysheniya ego urovnya*. Rezul'taty issledovaniy Rossiysko-Armyanskoy biologicheskoy ekspeditsii po gidroekologicheskomu obsledovaniyu ozera Sevan (Armeniya) (2005–2009 gg.). [Ecology of the Lake Sevan in the period of its level increase. Results of research of Russian-Armenian biological expedition for hydroecological survey of Lake Sevan (Armenia)]. 2010. Makhachkala: Nauka Dagestan Scientific Center: 348 p. (In Russian).
7. White J.D., Prochnow S.J., Filstrup C.T., Scott J.T., Byars B.W., Zygo-Flynn L. 2010. A combined watershed-water quality modeling analysis of the Lake Waco reservoir: I. Calibration and confirmation of predicted water quality. *Lake and Reservoir Management*. 26(2): 147–158. doi: 10.1080/07438141.2010.495315

8. White J.D., Prochnow S.J., Filstrup C.T., Byars B.W. 2010. A combined watershed-water quality modeling analysis of the Lake Waco reservoir: II. Watershed and reservoir management options and outcomes. *Lake and Reservoir Management*. 26(2): 159–167. doi: 10.1080/07438141.2010.495317
9. Shannon E.E., Brezonik P.L. 1972. Eutrophication analysis: A multivariate approach. *Journal of Sanitary Engineering Division. Proceedings ASCE*. 98(1): 37–58.
10. Carlson R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*. 22(2): 361–369.
11. Reckhow K. Lake quality discriminant analysis. 1978. *Journal of the American Water Resources Association*. 14(4): 856–876.
12. Yeasted J.R., Morel F.M.M. 1978. Empirical insights into lake response to nutrient loadings, with application to models of phosphorus in lakes. *Environmental Science and Technology*. 12(2): 195–201.
13. Ciecka J., Fabian R., Merilatt D. 1979. A statistical model for small lake water quality management. *Journal of the American Water Resources Association*. 15(5): 1318–1330.
14. Walker W.W., Jr. 1979. Use of hypolimnetic oxygen depletion rate as a trophic state index for lake. *Journal of the American Water Resources Association*. 15(6): 1463–1470.
15. Porcella D.B., Peterson S.A., Larsen D.P. 1980. Index to evaluate lake restoration. *Journal of Sanitary Engineering Division. Proceedings ASCE*. 1980. 106(6): 1151–1169.
16. Brown T., Simpson J. Determining the trophic state of your lake. 2001. *Watershed Protection Techniques*. 3(4): 771–781.
17. Cooke G.D., Welch E.B., Peterson S.A., Nichols S.A. 2005. *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*. Boca Raton-London – New York – Singapore, Taylor & Francis: 591p.
18. Lyatti S.Ya. 1932. *Materialy po issledovaniyu ozera Sevan i ego basseyna. Ch. IV, vyp. 2. Gidrokhimicheskiy ocherk ozera Sevan*. [Materials on investigation of the Lake Sevan and its basin. Part 4, Iss. 2. Hydrochemical essay of the Lake Sevan]. Transcaucasian Sevan Committee: 36 p. (In Russian).
19. Oganessian R.O., Parparov A.S. 1983. [Ecological aspects of Sevan problem]. *Trudy Sevanskoj gidrobiologicheskoy stantsii*. 18: 5–13. (In Russian).
20. Parparov A.S. 1983. [The summaries of research of primary production of Lake Sevan]. *Trudy Sevanskoj gidrobiologicheskoy stantsii*. 18: 14–50. (In Russian).
21. Parparova R.M. 1985. *Osobennosti krugovorota fosfora v ozere Sevan na fone izmeneniy ego gidrokhimicheskogo rezhima v svyazi s antropogennym vozdeystviem*. [Features of cycle of phosphor in Lake Sevan on the background of its hydrochemical regime changes under antropogenic impact. PhD Abstract]. Rostov-on-Don: 24 p. (In Russian).
22. Oganessian R.O. 1988. *Antropogennoe evtrofirovanie ozera Sevan i puti predotvrashcheniya ego otritsatel'nykh posledstviy*. [Antropogenic eutrophication of Lake Sevan and ways of prevention of its negative effects. SciD Abstract]. Moscow: 48 p. (In Russian).
23. Katsev S. 2017. When large lakes respond fast: A parsimonious model for phosphorus dynamics. *Journal of Great Lakes Research*. 43: 199–204. doi: 10.1016/j.jglr.2016.10.012
24. Kireev I.A. 1933. *Materialy po issledovaniyu ozera Sevan i ego basseyna. Ch. 5. Gidrograficheskie raboty na ozere Sevan*. [Materials on the investigation of the Lake Sevan and its basin. Part 5. Hydrographical research on the Lake Sevan]. Leningrad, Sovetskiy pechatnik: 132 p. (In Russian).
25. *EcoLur Network*. Available at: www.ecolur.org (accessed 20 September 2016).

Поступила 28.09.2016