

УДК 551.435.136: 551.248.2 (470)

**ВСЕЛЕНИЕ ЧУЖЕРОДНЫХ ВИДОВ ЦИАНОБАКТЕРИЙ
В ВОДОЕМЫ СРЕДНИХ ШИРОТ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ
ЛЕТНИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ АНОМАЛИЙ ВОЗДУХА**^{1,2}Шевырёв С.Л., ³Анциферова Г.А., ⁴Русова Н.И.¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток;²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, e-mail: shevirev@mail.ru;³Воронежский государственный университет, Воронеж, e-mail: g_antsiferova@mail.ru;⁴Военно-морской политехнический институт ВМПИ ВУНЦ ВМА «Военно-морская академия»
им. Н.Г. Кузнецова, Санкт-Петербург, e-mail: nadezhda_minnikova@mail.ru

На территории государственного природного заповедника «Воронинский» в среднем течении р. Ворона, крупного правого притока р. Хопер, входящей в бассейн среднего Дона, расположены проточно-руслые озера. К ним относятся озеровидные расширения русла реки, развивающиеся вследствие формирования активных неотектонических поднятий. Исследования сообществ фитопланктона и микрофитобентоса мелководных и среднеглубоких озер Рамза и Кипец проводились в 2007–2014 гг. В работе описаны изменения видового состава фитопланктона и микрофитобентоса озер в условиях среднестатистических климатических параметров (2007–2009 гг.), при аномально высоких летних температурах воздуха (2010–2012 гг.) и при возврате температур к среднестатистическим показателям (2013–2014 гг.). Анализ фактических данных, полученных для водоемов заповедника, показал, что таксономический состав сообществ диатомовых водорослей и цианобактерий отражает воздействие природных и антропогенных процессов, происходящих в пределах геосистемы «водоем – водосборная территория». Изменения видового состава вызываются флуктуациями в потоках вещества и энергии. При превышении обычных летних температурных показателей происходит увеличение объемов накопления в водоемах органического вещества, при этом качество вод снижается. Резкое изменение состава сообществ цианобактерий показывает их высокую миграционную способность. Аномально высокие летние температуры воздуха и вод способствуют распространению цианобактерий, которые являются чужеродными для региона и характерными для теплых водоемов и горячих источников. Возвращение параметров среды обитания к среднестатистическим вызывает их исчезновение, однако при этом получают распространение виды цианобактерий, характерные для загрязненных местообитаний и способные вызывать «цветение» вод. Среди них наблюдаются также признанные продуценты цианотоксинов. Появление таких видов в природных водоемах заповедника в условиях глобальных климатических изменений подтверждает опасность положительных температурных аномалий, поскольку они чрезвычайно негативно влияют на качество поверхностных вод.

Ключевые слова: водные экосистемы, диатомовые водоросли, загрязнение вод, климат, микрофитобентос, фитопланктон, цианобактерии, чужеродные виды

**IMMIGRATION OF THE ALIEN CYANOBACTERIAE
INTO THE BASINS OF MIDDLE LATITUDE TERRITORIES
UNDER CONDITIONS OF HIGH TEMPERATURE AIR ANOMALIES**^{1,2}Shevirev S.L., ³Antsiferova G.A., ⁴Rusova N.I.¹Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok;²Far Eastern Federal University, FEFU, Vladivostok, e-mail: shevirev@mail.ru;³Voronezh State University, Voronezh, e-mail: g_antsiferova@mail.ru;⁴Military educational scientific center of Navy «Naval academy of a name of the Admiral of Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov» (VUNTs Navy VMA), Saint Petersburg, e-mail: nadezhda_minnikova@mail.ru

The subject of our research, fluvial-riverbed lakes are located in the area of natural state reserve «Voronsky» in the middle flow Vorona river, the right tributary of Khopyor (middle Don basin). The lakes to be considered are the lake-like extensions of the riverbed, which were developed due to active neotectonic uplifts. Sampling of phytoplankton cenoses was made in the shallow and middle-deep lakes of Ramza and Kipets in 2007–2014. Paper comprises a change in species composition of phytoplankton and microphytobenthos of the lakes under conditions of standard climate regime (2007–2009), anomalous high summer temperature of the air (2010–2012) and after return of the temperature to standard values (2013–2014). Analysis of factual data taken from the natural reserve basins showed, that taxonomic composition of diatoms and cyanobacteriae reflects influence of natural and anthropogenic processes, which occur within of «basin – catchment area» system. Changes in species composition are provoked by fluctuations in substance and energy flow. Exceeding of common summer temperature values cause increasing of organic matter accumulation in basins, hence water quality drops. Steep changes in cyanobacteriae cenoses demonstrate their high migration ability. Anomalous high summer temperatures of water and air promotes extension of cyanobacteria, which are alien for the region, but typical for warm basins and hot streams. Return to mean environmental parameters makes alien species disappear, however species, which follow them are typical for polluted areas and may cause water blooming. Recognized cyanotoxins producers are among them. Occurrence of such species in the basins of natural reserve under conditions of global climatic changes proves danger of positive temperature anomalies due to their critically negative influence on the surface waters quality.

Keywords: water ecosystems, diatom, water pollution, climate, microphytobenthos, phytoplankton, cyanobacteriae, alien species

Урбанизация и ускоренное сельскохозяйственное развитие территорий Центрально-Черноземной части России приводят к усилению неблагоприятного антропогенного воздействия на поверхностные водоемы суши. Это затрудняет выбор водоемов – объектов для исследования собственно природных и климатических изменений. Рассмотрение проточных озер долины реки Ворона (правый приток р. Хопер, Тамбовская обл.), находящихся на особо охраняемой территории заповедника «Воронинский», в качестве эталонных, объясняется отсутствием прямого антропогенного воздействия на них, а также высоким эколого-биологическим качеством природных вод.

К настоящему времени для сообществ микроводорослей и цианобактерий водоемов средней полосы авторами собран обширный массив данных, значительная часть которого получена в эталонных объектах исследования – проточных озерах Воронинского заповедника. Опробованием там установлены богатые в видовом отношении ценозы диатомовых и сине-зеленых водорослей [1].

Формирование проточных озер в пойме р. Ворона обусловлено неотектоническими процессами и геологическим строением ее долины. Спутниковый ретроспективный мониторинг овражно-балочной сети показал локальную активизацию денудационных процессов в нескольких зонах долины р. Ворона между г. Кирсанов и Уварово Тамбовской области. В этих зонах размыв бортов долины и переотложение вещества, вызвавшее подпруживание поймы, были особенно активны благодаря присутствию предполагаемых неотектонических поднятий [1].

Имеющийся у авторского коллектива материал наблюдений в течение вегетационных сезонов 2007–2014 гг. позволил поставить целью проведение ретроспективного изучения миграционной способности представителей микрофитобентоса и фитопланктона, а также закономерностей в формировании и сохранении микрофитоценозов в условиях контрастных изменений природно-климатических условий. Для достижения поставленной цели охарактеризованы комплексы микроводорослей в условиях климата, типичных для лесостепной полосы (2007–2009; 2013–2014), а также при аномально высоких летних температурах воды и воздуха (2010–2012). Необходимые характери-

сти микрофитоценозов в условиях меняющейся среды включали определения видового состава цианобактерий и диатомовых водорослей, оценку их изобилия, а также экологическую специализацию. Выявляемые изменения в составе микроводорослей сопоставлялись с данными «*in situ*»: ландшафтными, геоморфологическими, а также космическими наблюдениями.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат проводимых исследований включает опробование и установление состава микрофитосообществ; полевые дистанционные космические наблюдения. Анализ частоты встречаемости микроводорослей в пробах позволил оценить их изобилие и соотнести с температурами воздуха в сезон проведения полевых работ. Дешифрирование космических материалов служит целям оценки факторов, влияющих на эволюцию водоемов суши: плоскостной смыв и неотектонические процессы.

Результаты исследования и их обсуждение

Совместными полевыми работами сотрудников заповедника и исследователей Воронежского госуниверситета (2006–2008 гг.) и последующих лет установлено, что характерной особенностью русла р. Ворона на участке наблюдений в районе п. Инжавино общей протяженностью более 20 км является петлеобразная форма русла, зарождение и развитие стариц. Средний уклон русла в этой части речной долины понижается до 10 см (10%), при 16 см (16%) на 1 км течения в верхнем течении реки [2]. Непосредственно выше этого участка на спутниковых снимках Landsat прослеживаются расширения русла, которые представляют уникальные для региона озера Рамза и Кипец составляющие озерную систему проточно-руслового типа (рис. 1). Свидетельства локальных неотектонических поднятий в долине р. Ворона обнаруживаются также в геологических разрезах у с. Ольховка (Тамбовская обл.). Субгоризонтально залегающие пески и алевроиты раннемелового возраста, вскрытые оврагом в интервале абсолютных отметок от 170 м до 180 м, ниже по течению Вороны отмечаются у уреза воды с отметкой 115 м. Процессы, вызвавшие амплитудное вертикальное смещение меловых пород, предположительно ответственны за возникновение оз. Кипец и Рамза [1].

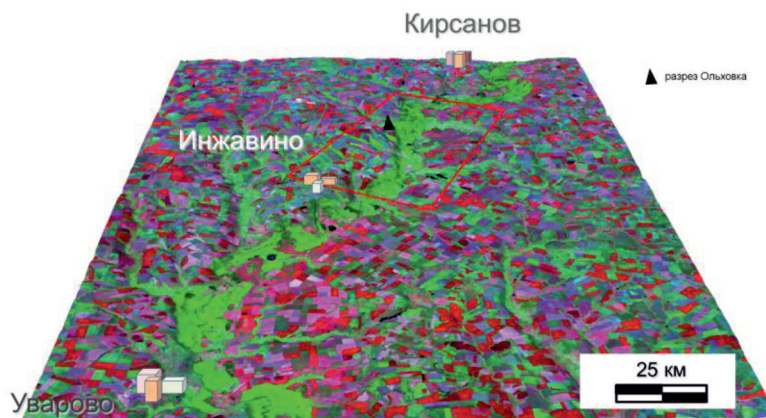


Рис. 1. Космофотоизображение (Landsat, каналы 7–4–2, состояние местности 1999–2002 гг.) долины р. Ворона на цифровой модели рельефа. Территория Воронинского заповедника показана прямоугольником

В изменяющихся погодно-климатических условиях оптическая прозрачность водоемов контролируется изменениями структуры микрофитоценозов [3]. Это, вероятно, связано со способностью диатомовых водорослей и цианобактерий участвовать как в поглощении веществ-биогенов, так и в процессе фотосинтеза, что обуславливает их высокую адаптационную способность.

Изученные ценозы микрофитопланктона и фитобентоса отличаются высоким разнообразием. Определения диатомовых водорослей в начальный (эталонный) период наблюдений включают 458 таксона, из них 47 родов. Среди них: *Stephanodiscus hantzschii* Grun., *S. rotula* (Kütz.) Hendey, *Aulacoseira alpigena* (Grun.) Krammer, *A. italica* (Ehr.) Grun. et var. *tenuissima* (Grun.) Sim., *A. granulata* (Ehr.) Sim., *A. islandica* ssp. *helvetica* (O.Müll.) Sim., *Cyclostephanos dubius* (Fricke) Round, *Melosira varians* Ag., *Fragilaria brevistriata* Grun., *F. crotonensis* Kitt., *F. construens* var. *venter* (Ehr.) Grun., *Synedra berolinensis* Lemm., *S. ulna* (Nitzsch.) Grun. et var. *aequalis* (Kütz.) Hust., *S. tabulata* (Ag.) Kütz., *Asterionella gracillis* (Hantzsch.) Heib., *Tabellaria flocculosa* (Roth.) Kütz., *Eunotia lunaris* (Ehr.) Grun., *E. bigibba* Ehr., *Navicula anglica* Ralfs., *N. bacillum* Ehr., *N. bicapitata* Hust. и другие. Эталонные сообщества сине-зеленых водорослей насчитывают 53 рода, 224 вида, в числе которых: *Dactylocopsis raphidioides* Hansg., *Merismopedia glauca* f. *insignis* (Schkorb.) Geitl., *Pseudoholopedia convoluta* (Bréb.) Elenk., *Microcystis hansgirgiana* (Hang.) Elenk., *M. pulvere* (Wood) For-

ti emend. Elenk. et f. *holsatica* (Lemm.) Elenk., *Gloeocapsa limnetica* (Lemm.) Hollerb., *Coeelosphaerium kützingii* Grun., *Anabaena has-salii* f. *minor* V. Poljansk., *A. spiroides* Kleb. Озера Воронинского заповедника рассматриваются нами как природные убежища-рефугиумы, обеспечивающие консервацию микроводорослей. Значимость подобных объектов для сохранения биоразнообразия заключается в том, что при благоприятных условиях среды они явятся центрами распространения микробиоты в водоемы, не сохранившие ее или ей существенно обедненные [4].

Многолетний мониторинг сообществ сине-зеленых водорослей показывает открытость озер заповедника «Воронинский» для вселения, адаптации и распространения новых, прежде не описанных здесь видов. Устойчивые аномально высокие температуры летнего времени в течение 2010–2012 гг. повлияли на состав микроводорослевых сукцессий. В описываемый период температура поверхностного слоя воды в озера заповедника превышала отметку 30 °C. Этот фактор явился критическим для ухудшения условий обитания первоначальных микрофитоценозов и снижения их видового разнообразия. Изменения условий привели к появлению в водоемах ранее не описанных здесь видов.

Для диатомовых водорослей, по наблюдениям 2012 г., это виды *Eunotia fallax* var. *gracillima* Krasske, *Cymbella ventricosa* var. *ovata* Grun., *Surirella didyma* Kütz.

В период жарких летних сезонов 2010–2012 г. ценозы сине-зеленых водорослей

стали существенно более разнообразны, чем в первые годы наблюдений. Температура вод оказалась наиболее значимой для расселения теплолюбивых видов цианобактерий *Phormidium paryraceum* (Ag.) Gom. и *Phormidium ambiguum* Gom. с оценками изобилия «нередко», «часто» и «очень часто».

Виды теплых вод и горячих источников, такие как *Phormidium laminosum* (Ag.) Gom., *Ph. tenue* (Menegh.) Gom., *Ph. valderiae* (Delp.) Geitl., *Anabaena birgei* G.M. Smith., *Nematonostoc flagelliformis* (Berk. et Curt.) Elenk., *Spirulina meneghiniana* Zanard., впервые появились в 2010–2012 гг. и успешно адаптировались. В анализах проб тех лет они получили оценки обилия «в массе». С оценками «очень часто» распространены виды *Microcystis aeruginosa f. pseudofilamentosa* (Grow) Elenk., *Lyngbya truncicola* Ghose, *Mastigocladus laminosus* Cohn., *Anabaena viguieri* Denis et Freym., *Merismopedia punctata* Meyen. Вид *Synechocystis aquatilis* Sauv. имеет оценки обилия «часто». Особого внимания заслуживает распространение в оз. Кипец с оценками обилия «в массе» вида *Ostillatoria coerulescens* Gickl., требующего для обильного распространения условий ила, обогащенного сероводородом.

Для микрофитоценозов нами описаны также ранее неизвестные в водоемах европейской части России виды: *Romeria chlorina* Böcher, *Lyngbya majuscula* Harvey, *Spirulina curta* (Lemm.) Geitl., *Merismopedia elegans* A.Br., *Gomphosphaeria lacustris f. compacta* (Lemm.) Elenk., *Woronichinia naegiliana* (Ung.) Elenk., *Spirulina labyrinthiformis* (Menegh.) Gom., *Spiruliba minima* A. Wurtz., *Anabaena minima* Tschernov, *Ostillatoria ornata f. planctonica* Ehr., *Phormidium fragile* (Menegh.) Gom., *Stigonema hormoides* (Kütz.) Born. et Flah., *Beckia bella* (G. Beck) Elenk., *Microcoleus lacustris* (Rabenh.) Farl.

В 2013–2014 гг. на территории исследования наблюдался возврат к обычным для этой географической широты температурным условиям. При этом из видового состава сине-зеленых водорослей практически исчезли таксоны, присущие теплым водам и горячим источникам. Среди теплолюбивых форм сохранились таксоны, установленные в 2007–2009 гг. Температурные всплески периода 2010–2012 гг. также оказали свое влияние и на качество вод озер заповедника.

Особенности экобиологической специализации микропланктона и микрофитобентоса показывают, что среди определений видов-индикаторов загрязнений «в массе» и «очень часто» в течение всего периода

наблюдений установлены *Phormidium foveolarum* (Mont.) Gom., *Spirulina jenneri* (Hass.) Kütz. В завершающие годы проведения мониторинга (2013–2014 годы) наряду с указанными выше, получают широкое распространение виды *Rhabdoderma lineare f. compositum* (G.V. Smith) Hollerb., *Microcystis wesenbergii* Komarek, *Anabaena affinis* Lemm., *Aphanothece clatrata* W. et G.S. West, *Aph. stagnina* (Spreng.) B.-Peters. et Geitl. и другие. С оценками обилия «часто» и «нередко» распространены *Microcystis aeruginosa f. pseudofilamentosa* (Crow) Elenk., *M. ichthyoblabe* Kütz. и другие.

Снижение качества вод, установленное к заключительному 2014 г., подтверждается развитием видов цианобактерий – продуцентов цианотоксинов, встречающихся с высокими оценками изобилия. Это виды *Anabaena constricta* (Szaf.) Geitl., *A. solitaria* Klebs, *Ostillatoria lauterbornii* Schmidle, *O. princeps*, *O. putrida* Schmidle, *O. splendida* Grev. и другие. Появление указанных сине-зеленых в водоемах заповедника подтверждает наличие опасности температурных аномалий для поверхностных водоемов суши особо охраняемых территорий.

Трансформация озерных экосистем, перенесенная ими в условиях климатических флуктуаций 2010–2012 гг., нашла свое выражение в обмелении водоемов и зарастании мелководий. Уменьшение средних глубин проточных озер русла Вороны обеспечило большую продолжительность периода высоких температур, благоприятных для активной вегетации сине-зеленых. Это сыграло роль в увеличении объемов органического вещества, аккумулируемого на дне водоемов в конце сезона за счет накопления остатков высших водных растений и планктона.

Как уже указывалось, в настоящем исследовании комплекса природных и антропогенных процессов, протекающих в период наблюдений в водоемах и на водосборных площадях, нами использовались геоинформационные методы, основанные на интерпретации спутниковых данных и лабораторные определения комплексов микроводорослей.

Обработка материалов съемок Landsat 1975–2010 гг. позволила сделать выводы о динамике зарастания акваторий проточных озер (рис. 2). Наряду с этим также выявлены участки сноса песчано-глинистого материала по периферии локальных поднятий, который способствует заилению водоемов [1]. Оценка состояния водосборной территории была проведена с помощью метода

ISODATA, позволившего классифицировать отраженные на космофотоснимке площади водосборов. Отслеживание флуктуаций в значениях NDVI (нормализованный вегетационный индекс) отразило концентрацию фотосинтезирующей биомассы наземной растительности и динамику эволюции площадей зарастания в акватории оз. Рамза, Кипец, а также русла р. Ворона. На материалах орбитальных съемок оконтурены зоны лесных и луговых ландшафтов и сельхозугодья. Детектирование ложбин поверхностного стока демонстрирует зоны активизации эрозионных процессов. Для них характерно

снижение плотности растительности, которая препятствует эрозии. О сокращении плотности наземной растительности в 1990–2010-х гг. также говорит снижение величины вегетационного индекса NDVI.

В то же время для озерных акваторий характерно увеличение NDVI, что подтверждает их активное зарастание высшей водной растительностью [5]. Мониторинг изменений NDVI согласуется с данными промеров глубин, свидетельствующих о значительных темпах обмеления и зарастания озера Рамза (рис. 3), находящего под-
тверждение в полевых наблюдениях [6].



Рис. 2. Использование алгоритма неконтролируемой классификации ISODATA (б) для анализа мозаичного снимка Landsat (каналы 7-4-2, состояние местности 1999–2002 гг.) (а). Интерпретация: 1 – площади здоровой вегетации; 2 – сельскохозяйственные угодья, 3 – области нарушенной растительности, являющиеся местами сноса глинистого материала, приводящие к заилению

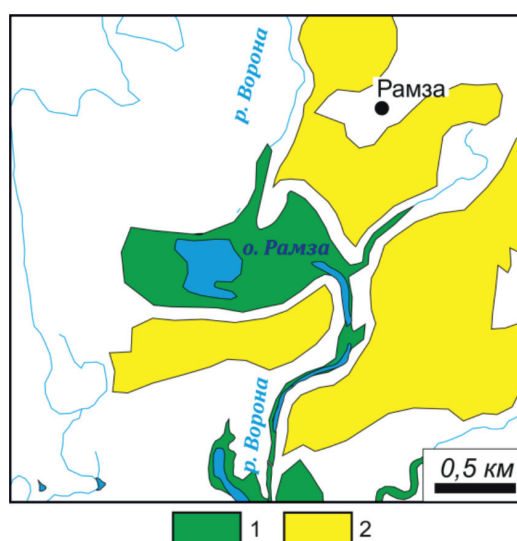


Рис. 3. Анализ динамики значений NDVI водосборов оз. Рамза с 1990 по 2010: 1 – участки положительной динамики NDVI (зарастающие), 2 – участки сокращения наземной растительности на водосборах

Заключение

Исследование процессов, происходящих в водоемах, в целом направлено на сохранение устойчивости экосистем. На их примере подтверждается общее представление о том, что водная экосистема является открытой, способной чутко реагировать на изменения условий среды. Таксономический состав сообществ фитопланктона и микрофитобентоса отражает воздействие природных и антропогенных процессов, происходящих в пределах геосистемы «водоем – водосборная территория». Полученные в 2007–2014 гг. данные показали высокую миграционную способность цианобактерий. При аномально высоких летних температурах воздуха и вод широкое развитие получают чужеродные для водоемов региона виды цианобактерий, характерные для теплых вод и горячих источников. При возврате среды обитания к среднестатистическим климатическим параметрам чужеродные виды практически исчезают. Однако в водоемах произошло увеличение объемов отмершего вещества, что повлияло на качество вод за счет органического загрязнения. Это обусловило развитие видов, характерных для загрязненных местообитаний, продуцентов цианотоксинов, в том числе способных вызывать «цветение» вод. Установлено, что положительные температурные аномалии предопределяют условия, негативно влияющие на качество поверхностных вод.

Список литературы / References

1. Анциферова Г.А., Козлов А.Т., Дорофеев В.В., Сумин А.И., Беспалова Е.В. Антропогенное эвтрофирование водоемов Окско-Донской низменности по сообществам

фитопланктона // *Естественные и технические науки*. 2017. № 11 (113). С. 144–147.

Anciferova G.A., Kozlov A.T., Dorofeev V.V., Sumin A.I., Bespalova E.V. Anthropogenic eutrofirovaniye of reservoirs of the Oka and Don lowland on communities of phytoplankton // *Estestvenny'e i texnicheskie nauki*. 2017. № 11 (113). P. 144–147 (in Russian).

2. Летопись природы. ФГУ «Государственный природный заповедник «Воронинский». Под ред. А.Н. Гудиной. Кн. 10. Инжавино, 2009. 119 с.

Chronicle of the nature. FGU «Gosudarstvenny'j prirodny'j zapovednik «Voroninskij». Pod red. A.N. Gudinoj. Kn. 10. Inzhavino, 2009. 119 p. (in Russian).

3. Борисова Л.Е. Оптический режим реки Ворона // *Труды государственного природного заповедника «Воронинский»*. Тамбов, 2011. Т. 2. 145 с.

Borisova L.E. Optical mode of Vorona River // *Works of the national Voroninsky nature reserve*. Tambov, 2011. T. 2. 145 p. (in Russian).

4. Анциферова Г.А., Русова Н.И. Долгосрочные последствия влияния аномально высоких летних температур воздуха 2010–2012 годов на водные экосистемы лесостепной зоны // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: География. Геоэкология. 2017. № 2. С. 5–12.

Anciferova G.A., Rusova N.I. Long-Term Consequences of the Influence of Anomalously High Summer Air Temperatures of 2010-2012 on Water Ecosystems of the Forest-Steppe Zone // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta*. Seriya: Geografiya. Geoe'kologiya. 2017. № 2. P. 5–12 (in Russian).

5. Красовская С.А. Растительность водоёмов поймы реки Хопра // *Труды Хопёрского государственного заповедника*. Вып. 3. Воронеж: Воронеж. кн. Из-во, 1959. С. 142–216.

Krasovskaya S.A. Vegetation of reservoirs of the floodplain of the Hopra River. Vy'p. 3. Voronezh: Voronezh. kn. Iz-vo, 1959. P. 142–216.

6. Потапова О.Е., Самодурова Л.Е. Комплексное обследование озера Рамза // *Труды государственного природного заповедника «Воронинский»*. Тамбов, 2009. Т. 1. С. 106–116. URL: <http://voroninsky.ru/data/uploads/TRUDI-1.pdf> (дата обращения: 18.10.2018).

Potapova O.E., Samodurova L.E. Comprehensive examination of the lake Ramza // *Trudy' gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Voroninskij»*. Tambov, 2009. T. 1. P. 106–116. URL: <http://voroninsky.ru/data/uploads/TRUDI-1.pdf> (date of access: 18.10.2018).