

УДК 551.526.8:551.521.1

А. В. Законнова, А. С. Литвинов

**АНАЛИЗ СВЯЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ
РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА С
ПОСТУПЛЕНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ¹**

По данным многолетних (1954—2013 гг.) наблюдений Рыбинской гидрометеорологической обсерватории проанализированы тенденции изменения суммарной солнечной радиации и температуры воды водохранилища. Установлена прямая зависимость температуры воды от радиации за вегетационный период и обратная зависимость количества атмосферных осадков, выпавших на зеркало водоема, и объема притока от поступающей радиации. Показано, что на температуру воды влияет не только солнечная радиация и температура воздуха, но и водность года.

Ключевые слова: солнечная радиация, многолетняя и сезонная динамика, температура воздуха, температура воды, Рыбинское водохранилище.

Солнечная радиация, поступающая на земную поверхность, — один из основных климатообразующих факторов — в значительной степени зависит от циркуляции атмосферы, что проявляется в ее облачности и прозрачности. Анализ многолетней и сезонной динамики суммарной солнечной радиации, ее связи с температурой воздуха и воды является основой эколого-гидрологического исследования. Особенно эта задача актуальна в связи с глобальным потеплением климата [1, 5]. Влияние солнечной радиации и температуры воды на численность, количество видов и биомассу фитопланктона Каневского водохранилища показано в работе [3].

Начиная с 70-х годов прошлого столетия, на побережье Рыбинского водохранилища наблюдается устойчивое повышение среднегодовой температуры воздуха со скоростью 0,55°C/10 лет. Зимой скорость возросла до 0,73°C/10 лет. [4]. Первое десятилетие XXI в. характеризуется повышением температуры воздуха на 2—3°C в январе, 1—2°C — в июле и увеличением периода с положительными температурами воздуха [8].

В настоящей работе анализируется связь температуры воды Рыбинского водохранилища с приходящей суммарной солнечной радиацией за каждый

¹ Авторы выражают благодарность д. б. н. И. Л. Пыриной за консультацию.

месяц вегетационного периода (условно май — октябрь) в многолетнем аспекте и в годы с разными гидрометеорологическими условиями.

Материал и методика исследований. Рыбинское водохранилище — водоем замедленного водообмена с сезонным и, частично, многолетним регулированием стока. Площадь водохранилища — 4550 км², объем — 25,4 км³, средняя глубина — 5,6 м [7]. На водохранилище проводятся мониторинговые исследования гидрометеорологических, гидрохимических и биологических характеристик с 1954 г. по настоящее время.

В работе использованы данные Рыбинской гидрометеорологической обсерватории (РГМО) (1954—1987 гг.) и метеостанции (МС) г. Кострома (1988—2013 гг.) по декадным и месячным значениям суммарной (прямой + рассеянной) солнечной радиации, рассчитанным по суточным данным актинометрических наблюдений. Для анализа использованы также средние (декадные, месячные) значения температуры воздуха (МС Рыбинск ГМО) и воды на постах, расположенных в прибрежных мелководных районах водохранилища (Переборы — юг, Брейтово — запад, Мяска — северо-восток) за период 1947—2014 гг., а также собственные данные авторов по температуре воды водохранилища, измеренной на шести стандартных станциях в экспедициях в мае — октябре 2001—2014 гг. (рис. 1). Характеристики элементов водного баланса Рыбинского водохранилища за отдельные годы взяты из гидрологической базы данных лаборатории гидрологии и гидрохимии.



1. Схема Рыбинского водохранилища. Плесы: I — Волжский; II — Моложский; III — Шекснинский; IV — Главный; стандартные станции: 1 — Коприно; 2 — Молога; 3 — Средний Двор; 4 — Наволоч; 5 — Измайлово; 6 — Брейтово.

Исследование связи суммарной солнечной радиации и температуры поверхностного слоя воды Рыбинского водохранилища за 60-летний период выполнено для отдельных месяцев вегетационного периода и за период май — октябрь. Сезонные изменения солнечной радиации, температуры воздуха и воды для характерных лет рассматривались по среднедекадным характеристикам, поскольку суточная радиация может изменяться в несколько раз и температура воды не всегда отвечает на кратковременные ее колебания.

Результаты исследований и их обсуждение

Данные по температуре поверхностного слоя воды, измеренной на береговых постах, расположенных в прибрежных мелководных районах Рыбинского водохранилища, не всегда дают правильное представление о температуре акватории водохранилища. Поэтому важно знать зависимость средней температуры акватории водохранилища от средней температуры воды, измеренной на трех береговых постах. Для безледного периода (май — октябрь) эта зависимость представлена формулой:

$$T_{\text{вдрх}} = -0,92 + 1,056 T_{3 \text{ поста}} (r = 0,95, n = 68),$$

где $T_{\text{вдрх}}$ — средняя температура воды водохранилища; $T_{3 \text{ поста}}$ — средняя температура воды, измеренная на водомерных постах Переборы, Брейтово и Мякса. Для отдельных месяцев вегетационного периода связь оказалась также довольно тесной. Самые высокие коэффициенты корреляции отмечены в июле и сентябре (0,96), низкие — в октябре (0,80).

Авторами установлено [4], что за период потепления (1976—2014 гг.) на 95%-ном уровне значимости прослеживается тенденция повышения температуры поверхностного слоя воды водохранилища в течение всего безледного периода при средней скорости роста $0,76^{\circ}\text{C}/10$ лет и максимальной — в мае и июле — соответственно 1,1 и $1,0^{\circ}\text{C}/10$ лет. В периоды различной водности изменения температуры воды и вклад дисперсии не однозначны. В многоводные фазы, характеризующиеся преобладанием циклонической погоды с большим количеством осадков, температура воды ниже средней многолетней, а в маловодные при преобладании антициклонической погоды — выше. При максимальном прогреве высокие температуры в поверхностном слое воды отмечались в маловодные и средние по водности годы ($24,2^{\circ}\text{C}$ — 1972 г.; $25,6^{\circ}\text{C}$ — 2010 г.), а низкие в — многоводные ($16,5^{\circ}\text{C}$ — 1976 г., $16,7^{\circ}\text{C}$ — 1987 г.).

За период 1954—2013 гг. для годового хода суммарной солнечной радиации характерно резкое увеличение месячных сумм от февраля к марту (в 2,3 раза), что объясняется возрастанием высоты солнца, продолжительности дня и прозрачности атмосферы. От апреля к маю поступление радиации увеличивается в среднем на 28%, особенно интенсивный прирост отмечен в третьей декаде месяца. Наибольших значений суммарная радиация достигает в июне ($629 \text{ МДж}/\text{м}^2 \cdot \text{мес}$). Минимальное поступление радиации наблюдается в декабре и составляет $35 \text{ МДж}/\text{м}^2 \cdot \text{мес}$. Преобладающая часть суммарной солнечной радиации (около 75%) приходится на май — октябрь.

В отдельные годы, в зависимости от характера атмосферной циркуляции и связанной с ней облачности, суммарная радиация существенно отличается от средних величин (табл. 1). Различия между максимальными и минимальными месячными значениями могут достигать в июне — июле 50%. В отдельные годы отмечается смещение максимума значений с июня на июль (2001, 2005, 2010 гг.) или на май (1993, 2008, 2011 гг.). Коэффициенты вариации месячных сумм радиации не превышают 20% и увеличиваются от мая к октябрю.

1. Статистические характеристики суммарной солнечной радиации (1954—2013 гг.), МДж/м²·мес

Характеристики	V	VI	VII	VIII	IX	X
Средняя	576,0	629,0	608,0	460,0	258,0	119,0
Максимальная	692,0	808,0	733,0	598,0	378,0	169,0
Годы	1975	1999	2001	2011	1976	2005
Минимальная	417,0	436,0	377,0	336,0	161,0	73,0
Годы	1974	1985	1993	2008	1990	1985
σ	59,0	70,0	73,0	58,0	46,0	23,0
E	-0,3	0,2	0,4	-0,2	0,7	-0,6
$V, \%$	10,0	11,0	12,0	15,0	18,0	19,0

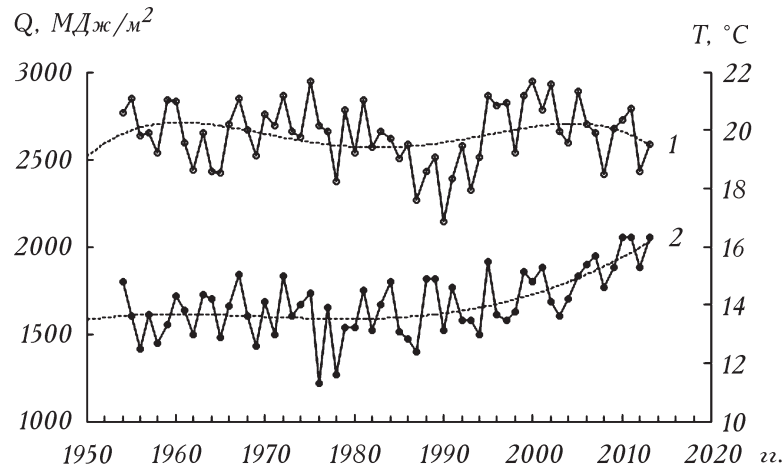
Примечание. Здесь и в табл. 2: σ — стандартное отклонение; E — коэффициент эксцесса; V — коэффициент вариации, %.

2. Статистические характеристики суммарной солнечной радиации (2001—2013 гг.), МДж/м²·мес

Характеристики	V	VI	VII	VIII	IX	X
Средняя	590,0	617,0	625,0	473,0	254,0	120,0
Максимальная	665,0	689,0	733,0	598,0	298,0	169,0
Годы	2002	2006	2001	2011	2004	2005
Минимальная	524,0	531,0	536,0	336,0	198,0	89,0
Годы	2001	2003	2008	2008	2011	2012
σ	45,0	49,0	79,0	70,0	44,0	23,0
E	-1,2	-0,7	-1,3	0,1	3,9	0,5
$V, \%$	8,0	8,0	12,0	15,0	17,0	20,0

Анализ месячных сумм радиации за вегетационный период 2001—2013 гг. показал рост ее значений в мае, июле, августе (3,0—3,5%) по сравнению с периодом 1954—2013 гг., при смещении максимума с июня на июль (табл. 2).

Анализ многолетней динамики суммарной солнечной радиации за май — октябрь позволил выявить два периода — уменьшения (1970—1990 гг.) и увеличения (1990—2013 гг.) Такие же изменения прослеживаются и для температуры воды (рис. 2). Наличие в многолетней динамике радиации хорошо выраженных двух периодов отмечено и на территории Западной Европы [6]. На европейской территории РФ повышение ее значений в 1990—2013 гг. подтверждается во Втором оценочном докладе Росгидромета и рассматривается как начавшийся возврат к уровню максимальных значений, наблюдаемых в 1960-х гг. [2].

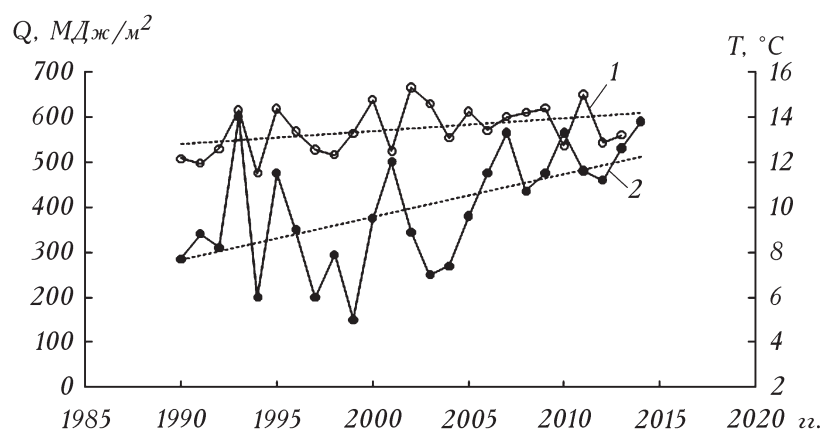


2. Многолетние изменения суммарной солнечной радиации (1) и температуры поверхностного слоя воды Рыбинского водохранилища (2) в мае — октябре. Пунктир — аппроксимация полиномом четвертой степени.

Оценка линейного тренда изменения сезонных сумм суммарной солнечной радиации за рассматриваемый период показала, что летом и осенью значимые изменения отсутствуют. За более короткий период (1990—2013 гг.) весной (май) отмечена тенденция к увеличению радиации со скоростью $29 \text{ МДж/м}^2/10 \text{ лет}$. При этом температура воды, в связи с особенностями прогрева разных плесов водохранилища, отличалась большей изменчивостью. Скорость повышения ее значений в мае составила $2,0^\circ\text{C} / 10 \text{ лет}$ (рис. 3).

Корреляционный анализ суммарной солнечной радиации и температуры поверхностного слоя воды в летний период выявил прямую зависимость температуры воды от радиации (июнь — $r = 0,62$, июль — $r = 0,55$, при $p < 0,05$). В мае коэффициент корреляции ниже ($r = 0,40$), что связано, по-видимому, с «возвратом холодов» и значительной изменчивостью температуры воды. Для осенних месяцев (сентябрь, октябрь), когда идет интенсивное охлаждение водохранилища, зависимость не обнаружена. В среднем за май — октябрь зависимость между температурой воды и радиацией менее тесная, но значимая ($r = 0,39$). Такие же коэффициенты корреляции получены при анализе зависимости приземной температуры воздуха от радиации.

Суточные суммы радиации подвержены более значительным колебаниям, чем месячные. За период 2001—2013 гг. в апреле максимальные значения изменялись от $19,6$ (2002 г.) до $25,6 \text{ МДж/м}^2$ (2013 г.), а минимальные — от $2,1$ (2008 г.) до $6,2 \text{ МДж/м}^2$ (2013 г.), что отразилось на сроках и продолжительности безледного периода. Максимальные различия составляют около 30 МДж/м^2 и наблюдаются в основном в третьей декаде июня при высоком солнцестоянии и продолжительной долготе дня. Интенсивность радиации порядка $20\text{—}25 \text{ МДж/м}^2$ можно наблюдать уже в апреле, в самом начале



3. Многолетние изменения суммарной солнечной радиации (1) и температуры воды (2) в мае.

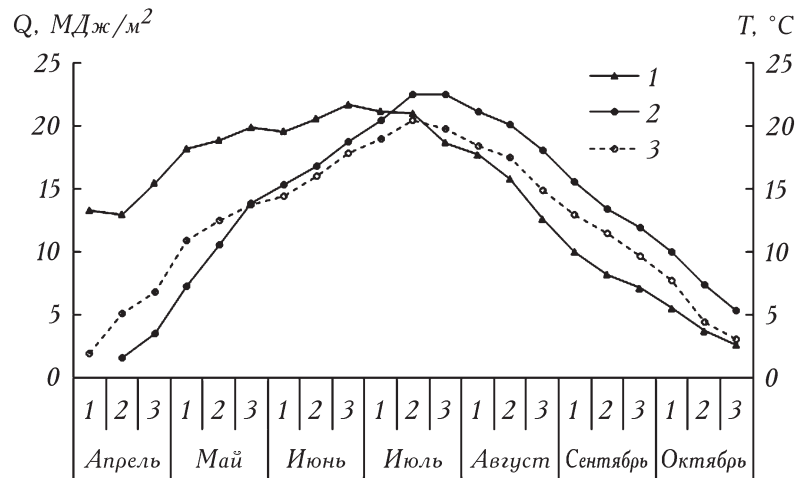
безледного периода. Однако в конце безледного периода она значительно ниже — менее 10 МДж/м² в октябре и 1—3 МДж/м² в ноябре.

В отдельные годы рост суточной радиации в апреле способствуют раннему очищению ото льда (11.04. 2007 г.) и быстрому прогреву водохранилища. Низкие суммы суточной радиации приводят к поздней дате очищения водоема (7.05.2003 г.) и более низкой температуре воды. Уменьшение радиации в первой декаде июня в большей степени влияет на температуру воздуха, чем воды (табл. 3).

Анализ среднедекадных сумм солнечной радиации, температуры воздуха и температуры поверхностного слоя воды Рыбинского водохранилища за период 2001—2013 гг. показал, что весной повышение температуры воздуха и, соответственно, температуры воды водохранилища идет практически

3. Среднедекадная суммарная радиация, температура воздуха и воды в весенний период

Месяцы	Декады	Солнечная радиация, МДж/м ²		Температура воздуха, °С		Температура воды, °С	
		2003 г.	2007 г.	2003 г.	2007 г.	2003 г.	2007 г.
Апрель	1	8,9	11,3	0,7	1,6	0,1	0,7
	2	12,5	14,1	4,5	6,1	0,1	2,8
	3	14,2	13,3	3,4	5,9	0,1	6,7
Май	1	16,9	15,6	9,6	6,1	2,9	8,1
	2	21,6	18,7	14,6	12,6	8,1	12,7
	3	22,3	23,5	15,1	20,5	12,8	19,2
Июнь	1	15,8	22,3	11,3	14,0	11,4	18,0



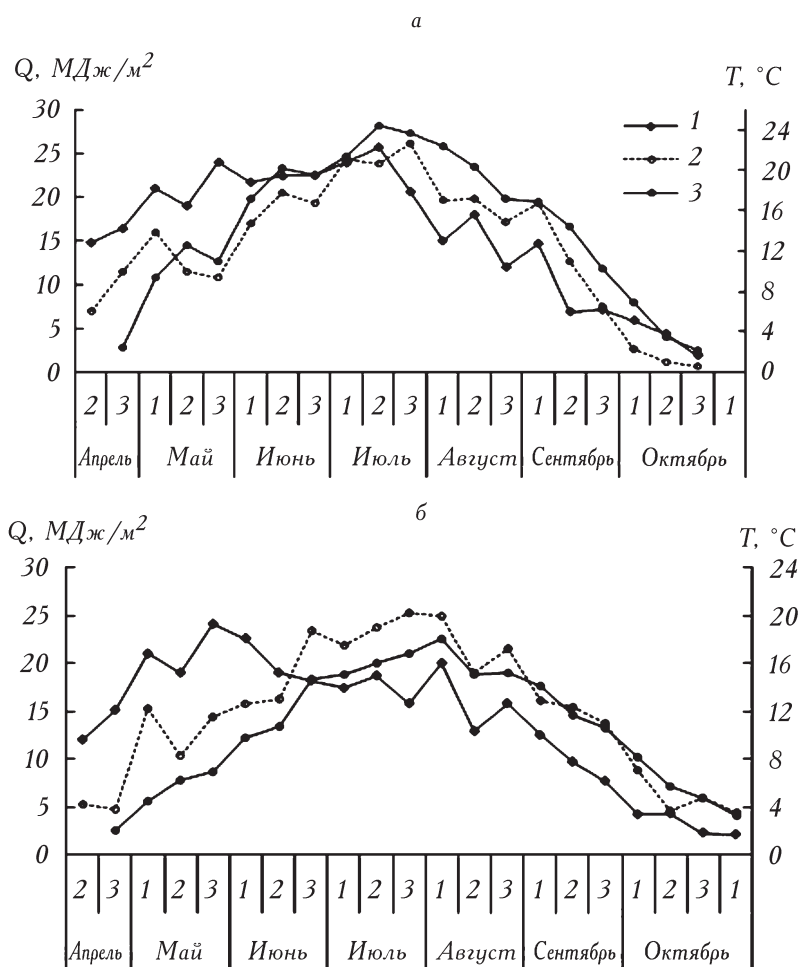
4. Динамика среднедекадной суммарной солнечной радиации (1), температуры воздуха (2) и температуры поверхностного слоя воды (3) Рыбинского водохранилища (2001—2013 гг.).

синхронно с поступлением солнечной радиации (рис. 4). При этом наибольшая ее величина отмечена в третьей декаде июня, в то время как максимальный прогрев водоема наблюдается позже — во второй — третьей декаде июля. В апреле — первой половине мая температура воздуха выше температуры воды водохранилища, в остальное время температура воды выше температуры воздуха.

Анализ декадных сумм радиации за многолетний период в мае показал, что от первой ко второй декаде месяца радиация растет в среднем на 16 МДж/м² (максимум — 75 МДж/м² в 1987 г.), в 27% случаев она уменьшается, что, как правило, не влияет на температуру воды, поскольку идет интенсивный прогрев водохранилища. В третьей декаде месяца суммарная радиация увеличивается на 35 МДж/м² по сравнению со второй (в отдельные годы — на 40—50% (1956, 2002 гг.)). Вместе с тем в годы, когда наблюдаются «возвраты холодов», сумма радиации за третью декаду мая ниже, чем за вто-

4. Гидроклиматические характеристики вегетационного периода (май — октябрь) в разные годы

Годы	Солнечная радиация, МДж/м ²	Температура воздуха, °С	Температура воды, °С	Осадки на зеркало водохранилища, км ³	Объем притока, км ³
1987	2298,0	11,9	12,4	2,16	26,12
1990	2146,0	11,6	13,1	2,25	20,97
2000	2948,0	12,9	14,8	1,27	10,03
2002	2929,0	12,9	14,1	0,78	4,58
2010	2729,0	14,9	16,3	1,64	12,62



5. Динамика среднедекадной солнечной радиации (1), температуры воздуха (2) и воды (3) в разные по водности годы: а — маловодный 2002 г.; б — многоводный 2004 г.

рую — 15% случаев, что приводит к снижению температуры воды водохранилища на 0,5—2,0°C (1957, 1977, 1993 гг.).

Многолетняя изменчивость солнечной радиации определяется общей циркуляцией атмосферы, и это хорошо согласуется с колебаниями суммы атмосферных осадков, выпавших на зеркало водохранилища. Коэффициент корреляции между суммарной солнечной радиацией и количеством атмосферных осадков за май — октябрь равен -0,70. Многоводный 1990 г. (сумма осадков за май — октябрь составила 142% нормы) отличался низкими суммами солнечной радиации и температурой воды ниже нормы, а маловодный 2002 г. (сумма осадков составила 50% нормы) — максимальными ее значениями и высокой температурой воды водохранилища (табл. 4).

Следует отметить, что установлена также достоверная обратная зависимость объема притока водохранилища за май — октябрь от поступающей радиации, но коэффициент корреляции ниже ($r = -0,44$).

В маловодный год наблюдалось два максимума поступления солнечной радиации (третья декада мая и вторая декада июля) и происходило запаздывание снижения температуры воды относительно изменения радиации (рис. 5). В многоводный год уменьшение суммарной радиации начинается с третьей декады мая, что не повлияло на температуру воды, и максимальные ее значения отмечены в первой декаде августа.

Заключение

В многолетней динамике суммарной солнечной радиации и температуры поверхностного слоя воды Рыбинского водохранилища выявлены два периода — уменьшения (1970—1990 гг.) и увеличения (1990—2013 гг.).

Установлена прямая зависимость температуры воды от суммарной солнечной радиации: май — октябрь ($r = 0,39$), май ($r = 0,40$), июнь ($r = 0,62$), июль ($r = 0,55$) и обратная зависимость между характеристиками водного баланса водохранилища — количеством атмосферных осадков и объемом притока — и поступающей радиацией (соответственно $r = -0,70$ и $-0,44$).

Суточные и декадные суммы радиации подвержены более значительным колебаниям, чем месячные, что отражается на сроках и продолжительности вегетационного периода. Повышение среднедекадной температуры воздуха и воды идет практически синхронно с поступлением солнечной радиации, но декады максимальных сумм радиации и наибольшего прогрева водохранилища не совпадают.

Солнечная радиация не служит единственным фактором, определяющим температуру воды. Важную роль в прогреве водной массы водохранилища и увеличении ее теплозапаса играет водность года.

**

За даними багаторічних (1954—2013 рр.) спостережень Рибінської гідрометеорологічної обсерваторії проаналізовано тенденції зміни сумарної сонячної радіації та температури води водосховища. Встановлено пряму залежність температури води від радіації за вегетаційний період та обернену залежність кількості атмосферних опадів, які випали на дзеркало водойми, і об'єму притока від радіації, яка надходить. Показано, що на температуру води впливає не лише сонячна радіація і температура повітря, а й водність року.

**

Trends in changes in the total solar radiation and water temperature in the reservoir have been analyzed on the basis of the data of long-term observations (1954—2013) conducted at the Rybinsk Hydrometeorological Observatory. The direct correlation between water temperature and solar radiation for the vegetation period and indirect correlation between the influx of radiation and the amount of precipitation that falls on the surface area of the reservoir are established. It is shown that water temperature is subject to the effect not

only of solar radiation and air temperature but of the water level in the reservoir during the year as well.

**

1. *Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А.* Климатические ресурсы солнечной энергии Московского региона. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. — 312 с.
2. *Второй* оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М.: Росгидромет, 2014. — 1008 с.
3. *Загорожна Г.М., Щербак В.І.* Вплив сонячної радіації і температури води на розвиток фітопланктону Канівського водосховища // Гідробіол. журн. — 2016. — Т. 52, № 5. — С. 18—27.
4. *Законнова А.В., Литвинов А.С.* Многолетние изменения гидроклиматического режима Рыбинского водохранилища // Гидролого-гидрохимические исследования водоемов бассейна Волги / РАН Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина. — Тр. Вып. 75 (78). — Ярославль: Филигрань, 2016. — С. 16—22.
5. *Лобанов В.А., Тоцакова Г.Г.* Особенности и причины современных климатических изменений в России // Географ. вестник. — 2016. — № 3 (38). — С. 79—88.
6. *Самукова Е.А., Горбаренко Е.В., Ерохина А.Е.* Многолетние изменения солнечной радиации на территории Европы // Метеорология и гидрология. — 2014. — № 8. — С. 15—24.
7. *Рыбинское водохранилище и его жизнь.* — Л.: Наука, 1972. — 364 с.
8. *Экологический атлас Ярославской области / Environmental Atlas of Yaroslavl region* // Департамент охраны окружающей среды природопользования Ярославской области / Под ред. Г.А. Фоменко. — Ярославль: Буки Веди, 2015. — 154 с.

Институт биологии внутренних вод РАН,
Борок, РФ

Поступила 13.02.17