

УДК 556.114.6(282.247.413.5)

ЗНАЧИМОСТЬ СООТНОШЕНИЙ ФОРМ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

И. Э. Степанова, **Е. М. Бикбулатова**

*Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН
Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок
E-mail: iris@ibiw.yaroslavl.ru*

Поступила в редакцию 24.01.14 г.

Значимость соотношений форм биогенных элементов для оценки современного состояния Рыбинского водохранилища. – Степанова И. Э., Бикбулатова Е. М. – На основании материалов, полученных в 2001 – 2011 гг., проведен анализ различных соотношений форм биогенных элементов в Рыбинском водохранилище и по ним дана оценка его экологического состояния. Наиболее информативным является отношение концентрации общего азота (TN) к общему фосфору (TP), среднее значение которого по всем станциям за исследуемый период составило 17,0, что в целом свидетельствует об отсутствии лимитирования развития фитопланктона в водоёме обоими элементами. Высокие значения абсолютной концентрации нитратного азота и его доли в сумме минерального азота (являющиеся немаловажными показателями нарастания эвтрофикации), а также процентного содержания неорганического фосфора в Волжском и верхней части Шекснинского плёса позволяют оценить их состояние как эвтрофное.

Ключевые слова: азот, фосфор, водохранилище.

Importance of the biogenic element form ratio for assessing the current status of the Rybinsk Reservoir. – Stepanova I. E. and Bikbulatova E. M. – Various ratios of the biogenic element forms in the Rybinsk Reservoir are analyzed and the ecological status of this reservoir is assessed on the basis of our materials collected in 2001 – 2011. The total nitrogen (TN) to total phosphorus (TP) ratio is the most informative parameter with an average value of 17.0 for all stations during the observation period, which indicates both the elements not limiting the phytoplankton development in the reservoir. The high values of the absolute concentration of nitrate nitrogen and its fraction in the total mineral nitrogen (which are important indicators of the increasing eutrophication) as well as the percentage of inorganic phosphorus in the Volga part and the upper reaches of the Sheksna part, allow us to characterize their status as eutrophic.

Key words: nitrogen, phosphorus, reservoir.

ВВЕДЕНИЕ

В водных экосистемах на концентрациях соединений азота и фосфора и, соответственно, на соотношениях их различных форм определяющим образом сказывается множество факторов различной природы. При устоявшемся гидрологическом режиме, небольших суточных вариациях температуры изменение соотношений концентраций соединений азота и фосфора может являться результатом множества одновременно протекающих биохимических процессов. Важную роль среди подобных процессов играют: ферментативный гидролиз белков и полипептидов в растворе и взвешях; дезаминирование растворенного и клеточного органического

ЗНАЧИМОСТЬ СООТНОШЕНИЙ ФОРМ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

вещества с выделением аммония; окисление аммония, нитритов и других промежуточных соединений, образующихся при бактериальной деструкции органических форм азота; ассимиляция аммония, нитритов, нитратов как автотрофами, так и гетеротрофными микроорганизмами; редукция нитратов и нитритов денитрифицирующими бактериями; фиксация атмосферного азота водорослями и бактериями. Ряд соотношений различных форм основных биогенных элементов определяет направленность происходящих в водоёме биохимических процессов, другие указывают на возможность лимитирования первичной продукции тем или иным элементом, третьи позволяют оценить трофический статус водоёма.

Цель исследования – анализ различных соотношений форм биогенных элементов в Рыбинском водохранилище и оценка его экологического состояния на современном этапе.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Определение неорганических форм азота и фосфора проводили стандартными методами (Семенов, 1977) на борту экспедиционного судна и в аттестованном Аналитическом центре Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. Органические формы фосфора и азота переводили в минеральные с помощью персульфата калия и определяли соответственно в виде ортофосфата и нитрата (Бикбулатов, 1974; Гапеева, 1984). Расположение станций приведено на рис. 1.

Основные исследования проводились в 2001 – 2011 гг. в период открытой воды на 6 стандартных станциях – Коприно, Молога, Наволок, Измайлово, Средний Двор, Брейтово. В 2007 – 2010 гг. сетка станций была расширена и были изучены более подробно Шекснинский и Моложский плёсы водохранилища.

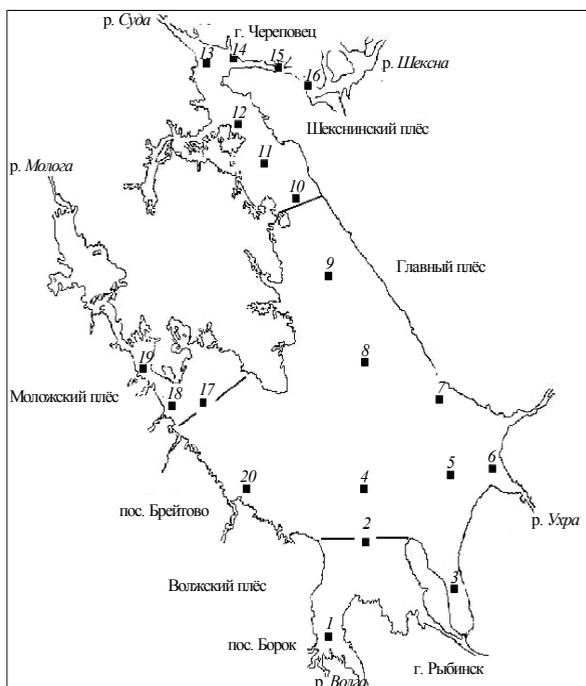


Рис. 1. Карта-схема расположения станций наблюдения на Рыбинском водохранилище: 1 – Коприно, 2 – Молога, 3 – Волково, 4 – Наволок, 5 – Всехсвятское, 6 – Ухра, 7 – Измайлово, 8 – Средний двор, 9 – Гаютино, 10 – Мякса, 11 – Любец, 12 – Ваганиха, 13 – устье Суды, 14 – устье Кошты, 15 – Ягорба, 16 – Кабачино, 17 – Первомайские острова, 18 – устье Себлы, 19 – Противье, 20 – Брейтово

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные (табл. 1, 2) свидетельствуют о сильных годовых и месячных колебаниях всех форм азота и фосфора, а также их соотношений. Отмечаются сезонные закономерности изменения содержания ряда форм биогенов. В частности, концентрация нитратов подвержена заметным сезонным колебаниям; минимальная в летний вегетационный период, она увеличивается к осени и достигает максимума к концу зимы, когда практически завершается разложение лабильных органических азотсодержащих веществ, непременно сопровождающееся нитрификацией и переходом всех неорганических форм азота в наиболее окисленную нитратную форму.

Таблица 1

Среднегодовые, минимальные и максимальные значения содержания (мгN/л или мгP/л) различных форм биогенных элементов и их соотношения за 2001 – 2011 гг.

Значения	NH ₄	NO ₂	NO ₃	N _{общ}	P _{мин}	P _{общ}	N / P	N _{мин}	N _{орг}	N _{мин} / N _{орг}	N _{орг} / N _{общ}	N _{мин} / N _{общ}	P _{мин} / P _{общ}
Среднее	0.062	0.005	0.14	0.93	0.020	0.061	17.0	0.23	0.72	0.42	0.75	0.41	0.52
Max	0.41	0.18	1.04	4.83	0.115	0.245	56.8	1.04	3.19	5.03	0.99	0.96	0.92
Min	0.007	0	0	0.01	0.002	0.009	3.0	0.003	0.01	0.01	0.17	0.01	0.02

Главными процессами, направленными на понижение концентрации нитратов в вегетационный период, является потребление их фитопланктоном и бактериями. При интенсивной деструкции органических веществ, которое обычно имеет место при осеннем массовом отмирании планктонных организмов, в окружающей среде резко уменьшается содержание свободного молекулярного кислорода и на локальных участках водохранилища создаются микроаэрофильные или анаэробные условия. В такой ситуации бактерии-денитрификаторы используют связанный кислород нитратов на окисление органических веществ, тем самым существенно понижая его содержание. Доля нитратного азота в общем содержании может снижаться от весны к лету в 3 – 4 раза (рис. 2).

Таблица 2

Среднемесячные, минимальные и максимальные значения содержания (мгN/л или мгP/л) различных форм биогенных элементов и их соотношения за 2001 – 2011 гг.

Значения	NH ₄	NO ₂	NO ₃	N _{общ}	P _{мин}	P _{общ}	N / P	N _{мин}	N _{орг}	N _{мин} / N _{орг}	N _{орг} / N _{общ}	N _{мин} / N _{общ}	P _{мин} / P _{общ}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Май													
Среднее	0.05	0.005	0.34	0.99	0.021	0.048	21.3	0.45	0.57	0.92	0.57	0.44	0.45
Max	0.2	0.046	0.96	3.25	0.055	0.080	50.0	1.04	2.43	3.46	0.88	1.18	0.93
Min	0.01	0	0.04	0.34	0.005	0.019	8.5	0.12	0.12	0.13	0.18	0.12	0.13
Июнь													
Среднее	0.06	0.007	0.23	1.02	0.018	0.048	22.9	0.31	0.71	0.63	0.67	0.33	0.45
Max	0.2	0.023	0.88	2.2	0.062	0.092	47.8	1.00	1.80	5.03	0.89	0.83	0.83
Min	0.01	0.001	0.06	0.42	0.004	0.009	8.0	0.10	0.07	1.12	0.17	0.11	0.13

ЗНАЧИМОСТЬ СООТНОШЕНИЙ ФОРМ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Июль													
Среднее	0.06	0.008	0.109	0.94	0.020	0.063	15.6	0.19	0.72	0.33	0.78	0.22	0.33
Max	0.15	0.018	0.43	4.83	0.063	0.243	18.0	0.61	4.22	1.88	0.98	0.65	0.86
Min	0.01	0	0	0.3	0.004	0.02	5.0	0.03	0.10	0.02	0.35	0.22	0.04
Август													
Среднее	0.07	0.004	0.23	0.88	0.022	0.065	14.8	0.19	0.78	0.17	0.83	0.12	0.33
Max	0.23	0.018	0.066	2.01	0.005	0.245	54.2	8.06	1.93	1.61	1.00	0.22	0.86
Min	0.007	0	0	0.4	0.22	0.024	4.4	0.01	0.26	0.01	0.38	0.01	0.04
Сентябрь													
Среднее	0.06	0.003	0.086	1.02	0.026	0.067	17.2	0.014	0.89	0.20	0.85	0.15	0.37
Max	0.28	0.02	0.004	2.75	0.095	0.012	79.2	0.48	2.70	0.95	0.99	0.49	0.96
Min	0.01	0	0.39	0.34	0.005	0.176	4.9	0.01	0.20	0.01	0.51	0.01	0.04
Октябрь													
Среднее	0.06	0.004	0.014	0.93	0.014	0.065	20.5	0.14	0.88	0.26	0.76	0.17	0.49
Max	0.16	0.017	0.87	3.62	1.43	0.197	181	0.090	3.22	1.96	0.99	0.66	0.90
Min	0.009	0	0.006	0.36	0.002	0.002	0.2	0.01	0.02	0.01	0.34	0.01	0.04

Амплитуда сезонных колебаний уровня нитратов и их процентного содержания может служить одним из показателей эвтрофирования водного объекта. В незагрязненных поверхностных водах концентрация нитрат-ионов не превышает величины порядка десятков микрограммов в литре (в пересчете на азот). С нарастанием эвтрофикации абсолютная концентрация нитратного азота и его доля в сумме минерального азота возрастают. Концентрация нитритов и их доля в общем содержании азота в летний период снижается до нуля фактически на всех исследованных станциях. Содержание органического азота в период массового развития водорослей сильно возрастает и его доля в общем может достигать в некоторых случаях 95% (рис. 3, а). Во всем водохранилище в это время отмечается снижение доли фосфатов в общем содержании фосфора (рис. 3, б). Воды волжского плёса значительно отличаются от весенних вод других плёсов как по содержанию общего азота, так и по соотношению его форм (рис. 4). Это наблюдалось ранее в 1960-е гг. (Трифонова, 1974) и в начале 1980-х гг.

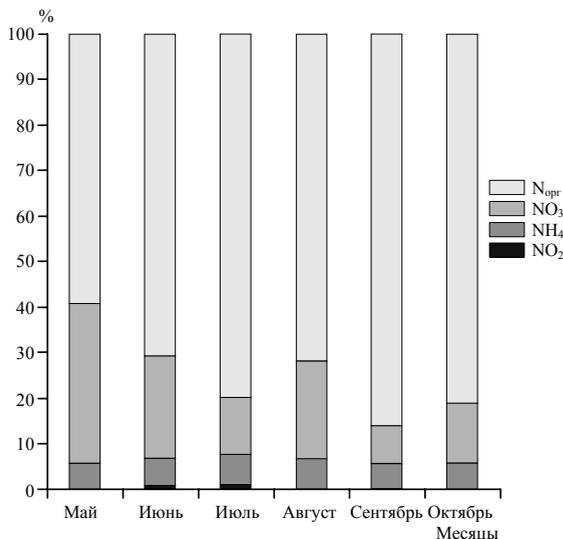


Рис. 2. Относительное содержание форм азота в среднем по водохранилищу в различные периоды исследования

прошлого столетия (Разгулин и др., 1984). Минеральные формы азота в Волжском плёсе в мае преобладали над органическими, составляя до 75% от общего азота. На других стандартных станциях этот процент был значительно ниже и колебался от 45 до 60.

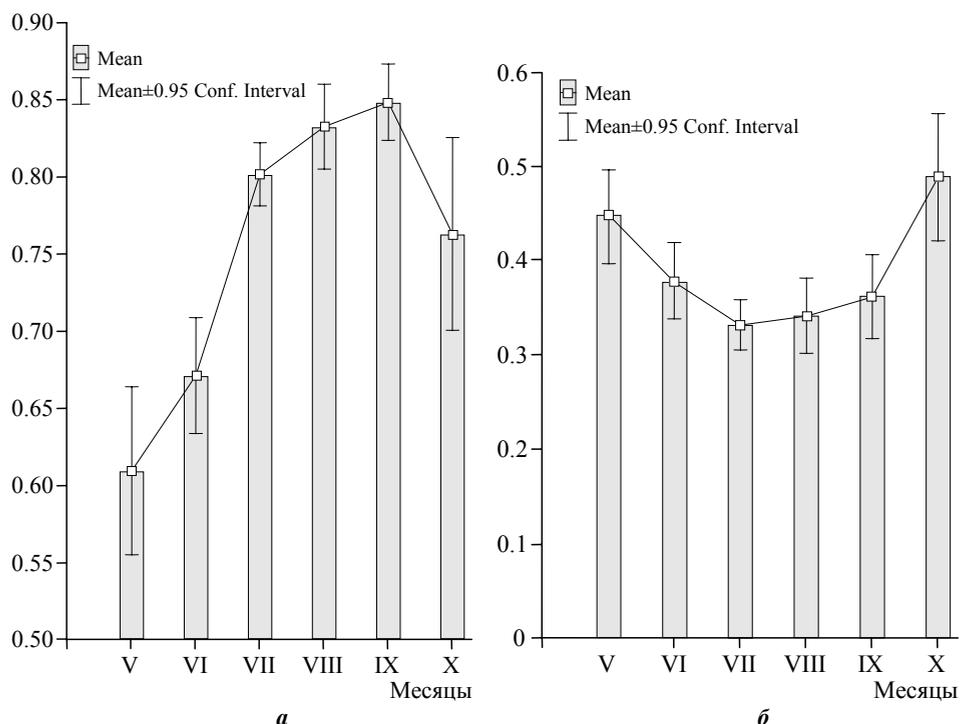


Рис. 3. Сезонная динамика доли органического азота (*а*) и фосфатов в общем содержании фосфора (*б*) (в среднем по водохранилищу)

Пространственная и сезонная неоднородность содержания минеральных и органических форм азота и фосфора в водных массах водохранилища определяются в основном характером питания и особенностями его морфометрии. В Волжском плёсе концентрация этих элементов в течение почти всех сезонов года значительно выше, чем в водной массе остальных частей водохранилища, формируемых водами половодья рек севера – Мологи и Шексны, площадь водосбора которых больше залесена, почвы более заболочены и меньше освоены. На режим соединений азота и фосфора в водоёме также большое влияние оказывают сточные воды городов, особенно Твери и Череповца, причем в Волжский плёс поступает большое количество промышленных сточных вод с высоким содержанием аммонийного азота. Летом воды различных частей водоема по своему химическому составу и физическим свойствам довольно однородны. Только в Волжском

ЗНАЧИМОСТЬ СООТНОШЕНИЙ ФОРМ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

плёсе (станция наблюдения Коприно) в начале лета несколько повышено содержание нитратов, нитритов и, соответственно, более высокий процент неорганического азота (см. рис. 4) Осенью после летнего минимума доля минеральных форм азота начинает возрастать и обычно достигает своего максимума к концу зимы.

В исследуемый период отмечено загрязнение органическими и неорганическими соединениями фосфора и азота верхней части Шекснинского плёса водохранилища (табл. 3). В реках Коште и Ягорбе наблюдались повышенные концентрации биогенных элементов; содержание неорганических форм азота и фосфора и их доля в общем содержании азота и фосфора в несколько раз превышали соответствующие величины, характерные не только для водохранилища в целом, но и Шекснинского плёса, куда непосредственно поступают воды этих рек. В нижней части Шекснинского плёса (станции наблюдения Мякса и Любец) доля неорганических форм азота и фосфора была сходной с таковой в Центральном плёсе.

Неорганические фосфаты, а часто и общий фосфор, используются для оценки трофического статуса водоёма. Нами ранее было показано, что для корректного отнесения водоёма к тому или иному трофическому типу необходимо учитывать регенерационный потенциал водных масс по фосфору (Бикбулатов, Степанова, 2002). Тем не менее, в отсутствие соответствующих потенциалов в первом приближении можно сделать грубую оценку трофического статуса по приведенным в таблицах данным. Средние концентрации как ортофосфатов, так и общего фосфора в целом не выводят Рыбинское водохранилище за пределы мезотрофии. Только состояние верхней части Шекснинского плёса за весь период открытой воды и Волжского плёса в отдельные периоды может оцениваться как эвтрофное.

Из множества приведенных в таблицах соотношений наиболее информативным оказывается отношение концентрации общего азота (TN) к общему фосфору (TP). Величины этих отношений определяют реакцию фитопланктона на биогенные элементы. Считается, что развитие водорослей лимитировано азотом при $TN/TP < 10$, фосфором при $TN/TP > 15 - 17$, а в диапазоне $TN/TP = 10 - 15$, близком к соотношению элементов в биологическом клеточном материале, первичная

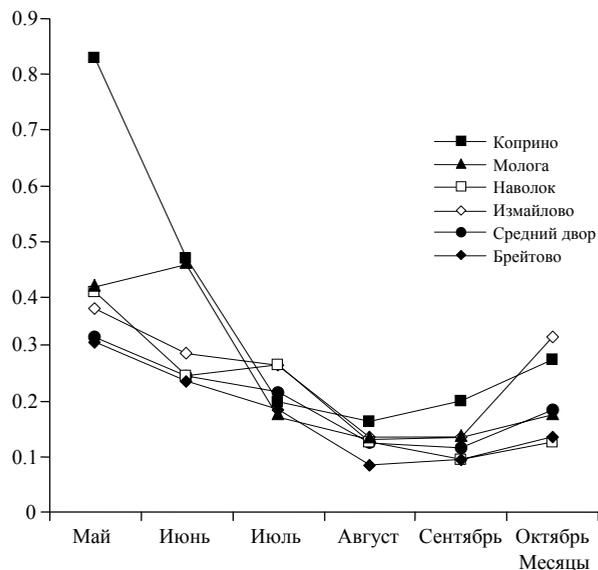


Рис. 4. Сезонная динамика доли содержания неорганического азота на станциях наблюдения

продукция практически не лимитирована ни одним из рассматриваемых элементов (Smith, 1982).

Таблица 3

Содержание биогенных элементов и их соотношения в различных плёсах водоёма
(по данным 2007 – 2010 гг., мгN/л или мгP/л)

Плёс	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	N _{общ}	PO ₄ ³⁻	P _{общ}	N/P	NO ₃ ⁻ / N _{общ}	P _{мин} / P _{общ}
Июнь									
Волжский	0.08	0.008	0.25	0.86	0.027	0.060	14.3	0.29	0.45
Центральный	0.06	0.001	0.11	0.72	0.012	0.029	21.4	0.15	0.40
Моложский	–	0.001	0.05	0.73	0.023	0.059	12.4	0.07	0.33
Шекснинский	–	0.008	0.20	1.01	0.045	0.080	15.1	0.20	0.56
Июль									
Волжский	0.07	0.005	0.07	0.86	0.027	0.059	14.6	0.08	0.45
Центральный	0.05	0.003	0.05	0.71	0.011	0.036	19.7	0.07	0.31
Моложский	–	0	0.02	0.73	0.028	0.070	10.4	0.03	0.40
Шекснинский	–	0.029	0.17	1.23	0.048	0.079	15.6	0.14	0.61
Август									
Волжский	0.08	0.003	0.075	0.69	0.040	0.060	8.16	0.10	0.66
Центральный	0.05	0.003	0.046	0.65	0.011	0.056	11.6	0.07	0.20
Моложский	–	0.000	0.014	0.54	0.015	0.038	14.2	0.03	0.39
Шекснинский	–	0.025	0.093	0.76	0.034	0.053	14.3	0.13	0.64
Сентябрь									
Волжский	0.04	0.005	0.030	0.70	0.053	0.088	7.95	0.04	0.60
Центральный	0.06	0.003	0.018	0.58	0.015	0.068	8.52	0.01	0.22
Моложский	–	0	0.006	0.42	0.026	0.078	5.38	0.03	0.33
Шекснинский	–	0.005	0.084	0.61	0.039	0.082	7.43	0.13	0.48

В Рыбинском водохранилище в вегетационный период отношение TN к TP варьировало в широких пределах (от 3.0 до 56.6), составляя в среднем 17.0, что, скорее всего, свидетельствует об отсутствии лимитирования развития фитопланктона в водоёме в целом обоими элементами. Именно это и является одной из причин слабых корреляционных связей между концентрациями азота и фосфора и хлорофиллом «а» (Степанова и др., 2012). Развитие фитопланктона в водоёме в большей степени зависит не только от обеспеченности клеток минеральными веществами в нормальных соотношениях, но и от световых условий, прерывания зоопланктона, динамики водных масс и различия в потребности отдельных групп водорослей в биогенных веществах. В соответствии с аналитическими табличными данными в Рыбинском водохранилище чаще всего отмечалось либо отсутствие лимитирования (42% случаев), либо наличие такового по фосфору (30%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из множества соотношений различных форм основных биогенных элементов наиболее информативным является отношение концентрации общего азота (TN) к общему фосфору (TP), среднее значение которого за 2001 – 2011 гг. в Рыбинском водохранилище по всем станциям составило 17.0, что в целом свидетель-

ЗНАЧИМОСТЬ СООТНОШЕНИЙ ФОРМ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ствует об отсутствии лимитирования развития фитопланктона в водоёме обоими элементами.

2. Для Рыбинского водохранилища характерны сезонные закономерности как изменения содержания ряда форм биогенов, так и некоторых их соотношений.

3. Средние концентрации как ортофосфатов, так и общего фосфора в целом не выводят Рыбинское водохранилище за пределы мезотрофии. Высокие значения абсолютной концентрации нитратного азота и его доли в сумме минерального азота (являющиеся немаловажными показателями нарастания эвтрофикации), а также процентного содержания неорганического фосфора в Волжском и верхней части Шекнинского плёса позволяют оценить их состояние как эвтрофное.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-00346).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бикбулатов Э. С. О методе определения общего фосфора в природных водах // Гидрохимические материалы. 1974. Т. 60. С. 167 – 173.

Бикбулатов Э. С., Степанова И. Э. Оценка трофности Рыбинского водохранилища с помощью потенциала регенерации биогенных элементов // Водные ресурсы. 2002. Т. 29, № 6. С. 721 – 726.

Гапеева М. В., Разгулин С. М., Скопинцев Б. А. Ампульный персульфатный метод определения общего азота в природных водах // Гидрохимические материалы. 1984. Т. 87. С. 67 – 70.

Разгулин С. М., Гапеева М. В., Литвинов А. С. Сезонная динамика и баланс биогенных элементов в Рыбинском водохранилище // Географические аспекты рационального природопользования в Верхневолжском Нечерноземье. Ярославль : Изд-во Ярослав. политехн. ин-та, 1984. С. 71 – 76.

Семенов А. Д. Практическое руководство по химическому анализу вод суши. Л. : Гидрометеиздат, 1977. 540 с.

Степанова И. Э., Пырина И. Л., Бикбулатов Э. С., Бикбулатова Е. М. Анализ связи степени развития фитопланктона с содержанием биогенных элементов в Рыбинском водохранилище // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах : материалы 5-го Всерос. симп. с междунар. участием / Карельский науч. центр РАН. Петрозаводск, 2012. С. 129 – 132.

Трифоновна Н. А. Соединения азота в Рыбинском водохранилище : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1974. 28 с.

Smith V. H. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes : an empirical and theoretical analysis // Limnol. Oceanogr. 1982. Vol. 23. P. 1248 – 1255.