

УДК 574.632

## ПУТИ ПОСТУПЛЕНИЯ ФОСФОРА В ВОДОХРАНИЛИЩА ВОЛЖСКОГО БАССЕЙНА

© 2014 Е.Е. Баранов

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти (Россия)

Поступила 12.11.2013

Проведен анализ литературных источников, отражающих поступление фосфора в различные водохранилища Волжского бассейна. Приведены конкретные схемы и механизмы поступления фосфорных соединений. Представлены качественные характеристики поступления фосфора в водоём. Рассмотрена пространственная динамика распределения фосфорной нагрузки на Волжский бассейн.

*Ключевые слова:* фосфаты, эвтрофирование, сточные воды

**Baranov E.E. The ways of phosphorus in the reservoirs of the Volga basin** – The analysis of the literature, reflecting the post-captivity phosphorus in various reservoirs of the Volga Basin. The concrete schemes and mechanisms of receipt of phosphorus compounds. Presents the qualitative characteristics of the revenues of phosphorus in the pond. The spatial dynamics of the distribution of phosphorus load on the Volga basin.

*Key words:* phosphates, eutrofirovanie, wastewater.

### ВВЕДЕНИЕ

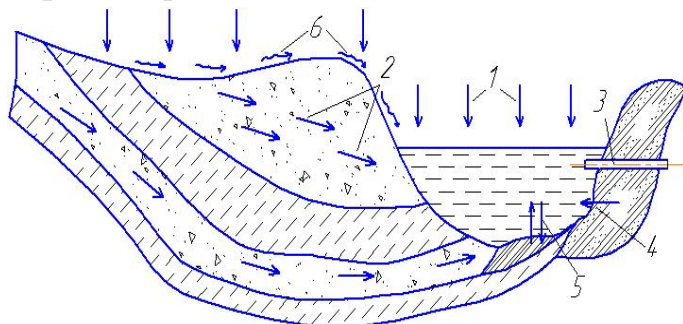
Как известно, увеличение популяции цианобактерий ведет к эвтрофированию водоемов. Доказано, что данный рост первичной продукции сине-зелёных водорослей зависит от многих факторов. В том числе и от концентрации и доступности форм биогенных элементов. Однако, лимитирующим элементом является фосфор. Процесс эвтрофирования особенно актуален для рек с высокой антропогенной нагрузкой. Для Российской Федерации это водохранилища Волжского каскада с их многочисленными притоками. Именно на Волге располагается колоссальный жилищно-коммунальный, сельскохозяйственный и производственный потенциал страны. В свою очередь, процесс эвтрофирования является отправной точкой для многих экологических проблем регионального и федерального уровней. Это и загрязнение водоёмов токсинами – продуктами жизнедеятельности цианобактерий, ухудшение качества воды по всем основным показателям, а также замор рыбы и огромные экономические расходы, связанные с очисткой заборной во-

---

Евгений Евгеньевич Баранов, аспирант, baranovee@mail.ru

ды. Всё это не позволяет нам оставаться равнодушными к проблеме эвтрофирования водохранилищ Волжского бассейна.

Не смотря на то, что с 90-х годов XX века сброс сточных вод неуклонно сокращается и в данный момент составляет порядка  $18 \text{ км}^3/\text{год}$ , это не вызывает пропорционального улучшения качества окружающей среды (Розенберг, Выхристюк, 2008).



**Рис. 1. Пути поступления фосфора в водоём:**  
1 – атмосферные осадки и таяние снега; 2 – сельскохозяйственная деятельность; 3 – коммунальные и промышленные сточные воды в виде точечных источников; 4 – эрозия почв; 5 – сезонная регенерация фосфора из донных минерализованных органических отложений; 6 – речной сток

отличающихся природой фосфорных соединений, концентрацией и объёмом (рис. 1). Данные источники не вмещают в себя все поступления фосфора, однако можно считать, что именно они формируют химический состав вод Волжского бассейна.

Экологическая обстановка во многих промышленно развитых регионах не несет позитивный характер, несмотря на реализацию природоохранных мер. В настоящее время наблюдается наращивание производственных мощностей как в сельскохозяйственном, так и в промышленном секторе, что естественно негативно сказывается на окружающей среде.

Традиционно считается, что фосфор в водоёмы поступает из нескольких источников,

## АТМОСФЕРНЫЕ ОСАДКИ И ТАЯНИЕ СНЕГА

Наблюдения показывают, что на открытых плоских берегах и побережьях водоёмов осадков выпадает меньше, чем на суше. Содержание растворимого фосфора в чистых атмосферных осадках (дождь, снег, иней) над континентами колеблется в пределах  $0,0003\text{-}0,006 \text{ мг/л}$ . Достоверный расчет по количеству фосфора, поступившего с атмосферными осадками на всей территории Волжского бассейна, на сегодняшний день является несостоятельным.

## СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Определение аграрной прибавки, т.е. дополнительного поступления биогенных элементов с водосбора за счёт агротехнических приёмов обработки почв и внесения удобрений представляет наибольшую сложность. Загрязнение водоёма продуктами сельского хозяйства происходит в результате двух составляющих: это продукты жизнедеятельности животных и вносимые в почву фосфорные удобрения. Фосфор, содержащийся в продуктах жизнедеятельности животных, представляет собой органические соединения и ус-

ваивается микроорганизмами почвы. Особую опасность представляют синтетические фосфорные соединения.

Органические соединения фосфора насчитывается около 200 различных препаратов, используемых в качестве инсектицидов, акарицидов, нематоцидов, фунгицидов, гербицидов, регулятора роста растений и бактерицидов (Гинзбург, 1981). Фосфор, входящий в состав удобрений полностью не вымывается из почв, а остаётся и аккумулируется в почвах примерно на 30%. Однако проблема не только в количестве вносимых удобрений. На протяжении многих лет в СССР культура ведения сельского хозяйства была на крайне низком уровне, например, в Японии и ФРГ вносили удобрений в 4,2 раза больше, чем в СССР, не нанося столь значительного ущерба окружающей среде. Установлено, что из-за нарушений технологий и работы технических средств 60-95% вносимых пестицидов и фунгицидов не достигают объектов подавления, нанося вред окружающей среде.

Волжский бассейн охватывает огромную территорию водосбора, на которой сельское хозяйство достаточно развито. Основная масса стока с сельскохозяйственных угодий поступает в Волгу и её притоки. В советское время считалось, что с поверхностным стоком с сельскохозяйственных угодий в реки поступало фосфора до 60-90% от общего количества. Вынос общего фосфора с с/х угодий в год составлял: 0,13 кг/га со слабо развитым земледелием, 0,5 кг/га в районах с интенсивным земледелием (Гинзбург, 1981).

Однако, наряду с фосфором, намеренно вносимым в почву, существует потенциальная опасность, исходящая от хранящихся на складах фосфорсодержащих пестицидов, несмотря на постоянное сокращение данных препаратов. Так, количество запрещенных и обезличенных пестицидов, на территории Волжского бассейна в период с 2002 по 2007 годы сократилось более чем в 2 раза, и составила 1280 тонн вместо 3587. Количество хранящихся негодных, устаревших и неидентифицированных пестицидов на территории Волжского бассейна для 2007 года составило 10011 тонн (Государственный доклад..., 2008).

## **ЭРОЗИЯ ПОЧВ**

С почв фосфор мигрирует в гидросферу благодаря механической, физико-механической, биогенной и техногенной миграции с образованием растворимых и нерастворимых комплексных соединений. Однако фосфор не обладает высокой степенью миграционной способности, т.к. большая часть его фиксируется живыми организмами.

На концентрацию фосфат-ионов в водоёме большое влияние оказывает степень облесения, видовой состав и интенсивность развития прибрежной лесостарниковой и луговой растительности, вид почв, окружающий водоём. Например, лесостарниковая и луговая растительность удерживает до 20% биогенных элементов, поступающих в водоём с водосбора.

В почвах содержится большое количество соединений фосфора. Каждый вид почв характеризуется своей уникальной концентрацией элемента,

различающийся кроме того по высоте слоя почв. Содержание фосфора в форме  $P_2O_5$  колеблется по почвенно-климатическим зонам: от 2 до 5 т/га в слое 0-20 см и от 8 до 30 т/га в слое 0-100 см. Концентрация повышается с севера на юг, от зоны дерново-подзолистых почв к серым лесным, доходя до максимума в зоне черноземов и каштановых почв, и снижается в зоне сероземов, субтропических почв. В пределах Волжского бассейна выделяется 6 почвенно-растительных зон и подзон.

Водная эрозия наиболее развита в лесостепной и степной зонах. Например, современный смыв почвы в Среднем Поволжье на пашне составляет 4-7 т/га и 8-18 т/га – с покатных склонов. В районах наибольшей сельскохозяйственной освоенности до 25-30% пахотных земель относятся к средне- и сильноосмытым (Розенберг, 2009). Количество поступающего фосфора зависит не только от интенсивности эрозии, но и от концентрации фосфора в почвах.

На момент создания, а также заполнения водохранилищ, вклад абразивной составляющей по приносу фосфора являлся доминирующим, за счёт содержания минеральных и органических форм фосфора во взвешях (Литвин, Кирюхина, 2003). С увеличением срока существования водоёма намечается тенденция к снижению темпов береговой абразии, происходит постепенное уменьшение поступление взвешенного вещества за счёт размыва мелководий по мере завершения формирования их рельефа.

### **СЕЗОННАЯ РЕГЕНЕРАЦИЯ ФОСФОРА ИЗ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ**

Освобождение фосфора происходит при взмучивании верхнего слоя ила, особенно на мелководье в ветреную и жаркую погоду, в бескислородных условиях, со слабой степенью проточности, при существенном уровне фосфатов в водохранилище. Данный вклад фосфора представляет незначительную долю от годового прихода (около 3%). Однако в вегетационный сезон, когда поступление биогенов с речным стоком не превышает 20-27% годового, роль этого источника как причина массового развития цианобактерий возрастает, особенно, если учесть, что биогены поступают в водную массу в доступной для автотрофных организмов форме.

Таким образом, в условиях хорошего прогрева воды в придонных слоях, за счёт минерализации остатков отмершего планктона, происходит значительное увеличение содержание фосфатов; в поверхностных – резкое снижение их концентрации ввиду интенсивного потребления фитопланктоном. Данный процесс специфичен для каждого участка водоёма (Трифонов, Васильева, 1993).

### **ПОСТУПЛЕНИЕ ФОСФОРА С РЕЧНЫМ СТОКОМ**

Смешение вод реки с водами её притоков – ведущий процесс в формировании химического состава водной массы. Вследствие этого происходит резкое изменение свойств водной массы на участке ниже впадения в реку от-

носителем крупного притока. Смешение этих потоков происходит не сразу, а на протяжении некоторого участка русла, расположенного между устьем притока и створом практически полного их смешения. Химический состав нижележащих водохранилищ формируется за счёт стока вышележащих водохранилищ. Происходит аккумуляция фосфора приносимого транзитом из вышележащих водохранилищ и боковых притоков.

Речная сеть Волжского каскада очень густа в лесостепной зоне и резко уменьшается к югу. При более чем 150 тысяч рек и речек длиной более 10 км, из которых 2,6 тыс. впадает непосредственно в Волгу, формирование боковой приточности практически заканчивается ниже слияния Волги с Камой. До слияния Волги и Камы в Волге речная сеть составляет 66,5 тыс. рек и речек общей длиной 261 тыс. км, в Каме – 73,7 тыс. рек и речек длиной 251, 6 тыс. км, Средняя и Нижняя Волга – 10,5 тыс. рек длиной 29,1 тыс. км (Розенберг, 2009).

В центральной и восточной частях (река Ока, Ветлуга, Вятка) преобладает снеговое питание (более 50%). В Приуралье 65-80% годового стока формируется за счёт талых вод, особенно в засушливых районах, хотя снега выпадает здесь относительно немного. Ниже Камы возрастает роль снегового питания, и в южной части бассейна оно доходит до 100%. Дождевое питание не играет существенной роли, но нередко наблюдается небольшие ливневые паводки по балкам, оврагам, играющие значительную роль в их развитии. Подземное питание существенно в лесостепной зоне; в степной оно снижается до 20% у рек с наиболее обширным водосбором (Розенберг, 2009).

Для Волжского бассейна показатели удельной водообеспеченности местным стоком составляет 184,5 тыс. м<sup>3</sup> в год на 1 км<sup>2</sup> территории. Основная часть речного стока в средней полосе приходится на весеннее половодье – около 70-80% (с максимумом в мае – 30-40%). Суммарный сток в зимнее время составляет порядка 5-8% (с минимумом в январе - марте – 1-2%), когда истощается подземное питание. На лето приходится порядка 7-9%, на осень 14-18% речного стока. Содержание фосфора в боковых притоках зависит от многих факторов, основополагающим из которых является степень антропогенной нагрузки, т.е. развитости промышленного и жилищно-коммунального сектора. Повышение фосфора в летний период объясняется именно поступлением фосфора с водосборной территории в период интенсивных осадков.

Концентрация минеральных форм фосфора в водохранилищах верхней Волги в среднем за год в период 1950-1965 гг. составил около 0,019 мг/л за год, для 2000 г. эта цифра составляет 0,025 мг/л. Для средней и нижней Волги это значение равно 0,089 мг/л. (Государственный кадастр..., 1990; Черняева, 2001). Концентрация фосфора в притоках колеблется в достаточно широком диапазоне: от 0,122 мг/л в р. Вятка до 2,900 мг/л в р. Гуца. Притоки Волги в виде небольших рек и речек не приводит к разбавлению Волжских вод, а наоборот увеличивают концентрацию фосфора.

## ПРОМЫШЛЕННЫЕ СБРОСЫ И КОММУНАЛЬНЫЕ СТОКИ

Волжский бассейн является крупнейшим в европейской части РФ, поэтому выбросы в водную среду на данной территории преимущественно поступают именно в Волжский бассейн.

Таблица 1

Мощность очистных сооружений по бассейнам рек, млн. м<sup>3</sup>  
(по: Черняев и др., 2002)

Название реки	Год	Поступление Р общ., тонн	Мощность очистных сооружений		Объем сточных вод, требующих очистки, млн. м <sup>3</sup>
			Всего, млн. м <sup>3</sup>	В том числе перед сбросом в водные объекты, млн. м <sup>3</sup>	
р. Волга	2000	12026,0	13706,4	13428,4	9093
р. Ока	2000	5925,9	6554,7	6532,2	3805,2
р. Кама	2000	2482,7	2889,4	2814,3	1904,5

Действующие очистные сооружения обеспечивают эффективную очистку лишь для 8% объема загрязнённых вод. Для 2000 г. сброс общего фосфора в поверхностные водные объекты европейской части России, включающей в себя Северо-Западный, Центральный, Волго-Вятский, Центрально-Черноземный и Поволжский экономические районы, составляет 14152 т (табл. 1).

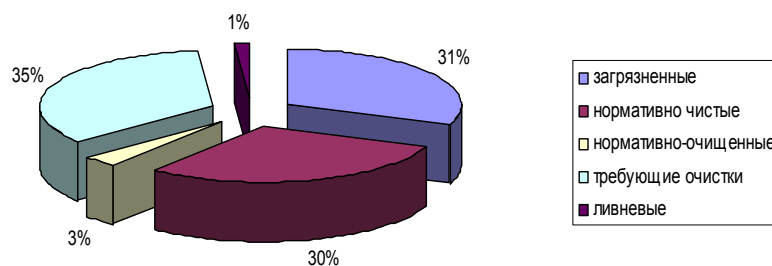
В Волжском бассейне городское население превышает среднюю норму по России и составляет 77,3%. Оно сосредоточено более чем в 600 городах, т.е. 50% всех городов России (Селезнева, 2007), здесь расположена доминирующая часть промышленного производства. Количество сточных вод, сбрасываемых в бассейн Волги, составляет 18049,3 млн. м<sup>3</sup>/год, что составляет 30,2% от объема сточных вод, образующихся на всей территории России.

Таблица 2

Водопользование Волжского бассейна, млн. м<sup>3</sup>

Период	Сброшено сточных вод	В том числе			Мощность очистных сооружений
		Без очистки	Недостаточно очищенные	Нормативно очищенные	
2007	16356,65	477,37	6282,82	809,90	13353,44

Эффективность работы очистных сооружений для коммунальных стоков, как и для промышленных стоков, в регионе крайне низкая, качество воды большинства водных объектов не отвечает нормативным требованиям. Кроме этого очистка сточных вод от фосфора менее эффективна, чем от других от других биогенных элементов. При тенденции сокращения общей массы вредных веществ, поступающих в Волгу со сточными водами, уровень загрязнения воды не меняется (табл. 2).

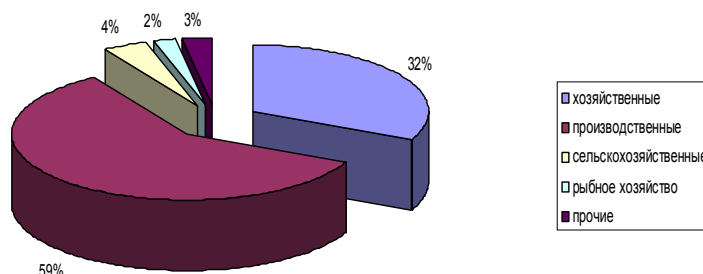


**Рис. 2. Соотношение типов сброшенных вод в Волжский бассейн**

Например, на территории Самарской области находится 850 очистных сооружений общей мощностью 156 млн. м<sup>3</sup> и протяженностью длин плотин более 156,5 км, из них около 550 бесхозных гидротехнических сооружений общей мощностью более 72 млн. м<sup>3</sup> и протяженностью длин плотин более 98 км, т.е. половина мощностей не задействована из-за неудовлетворительного состояния сооружений. Таким образом, большая часть сбрасываемых в Волгу вод является неочищенной или недостаточно очищенной (рис. 2) (Государственный водный..., 2007).

В данных сбрасываемых сточных водах доминируют промышленные стоки, в меньшей степени коммунальные. При заборе воды с Волжского бассейна большая часть также используется в промышленных целях (рис. 3) (Государственный водный..., 2007).

Поступление фосфора за счет сброса коммунальных стоков на всей протяженности Волжского бассейна достаточно сильно отличается. Например, в 2001 г.: реки Марий Эл – 3,5 т/год, Чувашии – 94,5, Татарстана – 36, Ульяновской области – 35,6 (Розенберг, Выхристюк, 2008). Таким образом, из рек Чувашии в Волгу сбрасывается почти в 30 раз больше фосфора, чем из рек Марий Эл. Однако, если рассматривать даже относительно благоприятные районы с точки зрения экологии, то ожидаемого положительного фона не наблюдается, т.е. степень загрязнённости водохранилищ Волжского каскада на всей его протяженности является от загрязнённой до очень грязной (Государственный доклад..., 2012).



**Рис. 3. Использование воды Волги и её основных притоков на различные нужды**

Вклад тридцати девяти субъектов Российской Федерации, полностью или частично расположенных в бассейне Волги, в промышленное и сельско-

хозяйственное производство страны составляет примерно половину от соответствующих общенациональных показателей. Ни в одном из городов бассейна Волги качество питьевой воды не соответствует ни существующим национальным нормам, ни стандартам ВОЗ. В то же время надо отметить, что многие экологические стандарты в бассейне Волги, как и по всей России, – более жесткие, чем международные; в ряде случаев водопользователям их даже слишком трудно соблюдать. На самом деле, в последнее время появились обнадеживающие данные, что в ряде регионов Волжского бассейна рост производства не сопровождается пропорциональным ростом сброса загрязненных сточных вод (Отчет о состоянии..., 2006). Такая же картина наблюдается и по регионам в отдельности, например для Самарской области в период с 2001 по 2008 гг. сброс фосфора уменьшается в среднем на 14% (937 тонн вместо 1088).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя вышеизложенное, необходимо выделить некоторые концептуальные положения. В данной работе выделено 6 источников поступления фосфора. Для адекватных математических расчетов нами был сделан ряд обобщенных допущений:

1. Атмосферные осадки в виде дождя и талого снега выпадают на всей территории Волжского бассейна, как на высоко урбанизированных территориях (города, промышленные объекты), так и на территориях относительно слабо подверженных антропогенному воздействию (леса, пашни, жилые массивы без централизованного водозабора и водосброса). Атмосферные осадки с территорий городов и промышленных площадок составляют часть баланса ливневых стоков коммунальных и промышленных сбросов и учитываются в точечных источниках поступления фосфора в бассейн Волги. Атмосферные осадки, выпадающие на территории лесов, полей, пашен и т.д. учитываются в балансе сельскохозяйственной деятельности и эрозии почв.

2. Фосфор, попадающий в водоём в результате сельского хозяйства и в результате эрозии почв, также необходимо рассматривать совместно, т.к. фосфор удобрений попадает в водоём вместе с почвой и, следовательно, является частью фосфора, попадающего в результате эрозии почв.

3. Коммунальные и промышленные стоки также рассматриваются совместно, т.к. они формируют один поток водослива горколлектора и представляют собой точечные источники загрязнения водоёма.

4. Сезонная регенерация фосфора из донных отложений очень специфична и практически независима от других источников поступления фосфора, поэтому данная составляющая приходного баланса элемента должна рассматриваться отдельно.

5. Фосфор, попадающий в результате речного стока, является в нашей работе не принципиальной задачей, поскольку мы рассматриваем не отдельно реку Волгу, а всю территорию Волжского бассейна, со всем многообразием рек, речек, озер и водохранилищ, формирующих Волжский каскад. А



фосфор, поступающий в результате формирования речного стока, как следствие питания дождевой, снеговой компонентой нами уже учтен в балансе точечных источников загрязнения и фосфора, поступающего в результате с/х деятельности и эрозии почв.

6. Всё это позволяет свести имеющиеся расчётные данные в табл. 3.

Таблица 3

Элементы баланса поступления фосфора в Волжский бассейн

Приход фосфора	Количество, тыс. тонн
Неточечные источники (атмосферные осадки, с/х деятельность, эрозия почв)	22700
Точечные источники (ливневые стоки, коммунальные и промышленные стоки)	12980
Регенерация из донных отложений	1100
Всего	36780

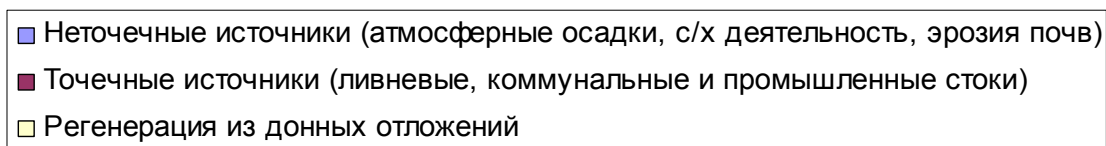
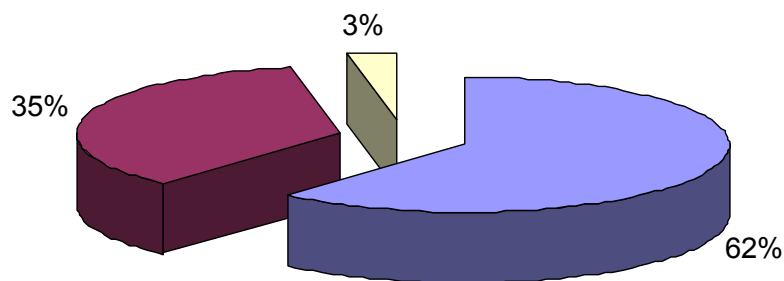


Рис. 4. Элементы баланса поступления фосфора в Волжский бассейн

Приведенная на рис. 4 диаграмма достаточно условна, т.к. характеризуют интегрированный вклад по всей протяженности Волжского бассейна и для отдельно взятого года. Однако качественная зависимость в среднем остаётся постоянной. Более половины фосфора, приносимого в водоём, поступает от неточечных источников и вследствие своей природы является непредсказуемым и практически неконтролируемым. Треть поступающего фосфора имеет ярко выраженную техногенную природу происхождения, которая поддается четкому учету, а также отработанным механизмам корректировки фосфорсодержащих соединений в данном источнике. Именно на данный источник поступления фосфора можно воздействовать и контролировать данное воздействие. Положительный результат можно добиться в результате комплексных программ. Это – увеличение мощностей и эффектив-

ности очистных сооружений. Параллельное реконструирование экономической базы, затрагивающей не отдельно взятую проблему ефтрофирования, а охватывающей весь комплекс негативной стороны вопроса, вплоть до полного отказа использования фосфатов в производстве СПАВов, усовершенствование технологии внесения фосфорсодержащих удобрений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

**Гинзбург К.Е.** Фосфор основных типов почв СССР. М.: Наука, 1981. 223 с. – **Государственный водный** кадастр. Ежегодные данные о качестве поверхности вод суши 1989 г. Том I (25). Куйбышев: ФОЛ Приволжского УГКС, 1990. 63 с. – **Государственный водный** реестр, 2007. – **Государственный доклад** «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2011 году». М.: Министерство природных ресурсов и Российской Федерации, 2012. 351 с. – **Государственный доклад** «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации». М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. 397 с.

**Литвин Л.Ф., Кирюхина З.П.** Почвенно-эрозионная миграция биогенов и загрязнение поверхностных вод // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 14. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. С. 45-63.

**Отчет о состоянии** дел. Обзор управления экологическими рисками в бассейне Волги и бассейных рек Европейского Союза. М., 2006. 25 с.

**Розенберг Г.С.** Волжский бассейн: на пути к устойчивому воздействию. Тольятти: Кассандра, 2009. 265 с. – **Розенберг Г.С., Выхристюк Л.А.** Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник). Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. 17 с.

**Селезнёва А.В.** От мониторинга к нормированию антропогенной нагрузки на водные объекты. Самара: СамНИЦ РАН, 2007. 105 с.

**Трифорова Н.А., Васильева Н.В.** Оценка содержания фосфоэфиров и их ферментативной деструкции в Рыбинском водохранилище // Тр. Ин-та биол. внутр. вод. № 67. Органическое вещество донных отложений волжских водохранилищ. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. С. 103-114.

**Черняев А.М., Прохорова Н.Б., Белова Л.П., Козлова Ю.Б., Крутикова К.В., Пономарева Л. А., Сохарева Л.В.** Воды России (состояние, использование, охрана) 1996-2000 гг. РосВНИИХР, Екатеринбург, 2002. 180 с. – **Черняева А.В.** Вода России. Водохранилища. ФГУП РосНИИВХ. Екатеринбург: Издательство «Аква-Пресс», 2001. 230 с.