

- сельских территорий в обеспечении Волжско-Камского каскада // Природоустойчивого развития АПК: материалы Международной научно-практической конференции. – М.: МГУП, 2007. – Ч. 1. – С. 237–241. *Материал поступил в редакцию 03.06.14.*
2. Практикум по инженерной гидрологии и регулированию стока: учеб. пособия / Е. Е. Овчаров, Н. Н. Захаровская [и др.]; под ред. Овчарова Е. Е. – М.: 2008. – 222 с.
3. **Иванов Е. Г., Исмаилов Г. Х.** Оценка пространственной и временной изменчивости притока к водохранилищам Волжско-Камского каскада // Природоустойчивого развития АПК: материалы Международной научно-практической конференции. – М.: МГУП, 2007. – Ч. 1. – С. 237–241. *Материал поступил в редакцию 03.06.14.*
- Смирнова Марина Александровна, аспирантка**
Тел. 8-926-845-77-99
E-mail: smirnova.ma-smirnova@ya.ru
- Перминов Алексей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидрология, гидрогеология и регулирование стока»**
Тел. 8-963-638-62-62
E-mail: alexperminov@gmail.com

УДК 502/504:556.3

О. А. ФЕДОТОВА, Н. В. МУРАЩЕНКОВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СЕЗОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА БАСЕЙНА ВЕРХНЕЙ ВОЛГИ*

Приведены результаты анализа и оценки изменчивости элементов водного баланса за периоды весеннего половодья и межени по четырем частным водосборам бассейна Верхней Волги. Рассматривается динамика пространственно-временной изменчивости речного стока и таких определяющих его климатических факторов, как атмосферные осадки, суммарное испарение и изменение бассейновых запасов влаги. Для периода межени и года характерно увеличение речного стока соответственно на 56 мм / 96 лет и 30 мм / 96 лет, сток весеннего половодья снижается на 28 мм / 96 лет. При оценке значимости линейного тренда сезонных элементов водного баланса по методике И. И. Поляка и по коэффициенту корреляции R установлено, что большинство рядов являются стационарными. Выявленные закономерности изменчивости и степени взаимосвязи сезонных элементов водного баланса бассейна Верхней Волги, позволяют по сезонным величинам атмосферных осадков и испарения оценить сток в годы различной водности.

Бассейн Верхней Волги, элементы водного баланса, речной сток, атмосферные осадки, суммарное испарение, бассейновые запасы влаги, линейный тренд.

There are given results of the analysis and assessment of the changeability of water balance elements for periods of spring flood and low water on four private water catchments of the Upper Volga basin. There is considered the dynamics of spatio-temporal changeability of the river flow and such determinative its climatic factors as atmospheric precipitation, total evaporation and changing of basin moisture stocks. For the period of low water and a year increasing of the river flow is typical by 56 mm / 96 years and 30 mm / 96 years correspondingly, the flow of spring flood decreases by 28 mm / 96 years. When assessing the significance of the linear trend of seasonal elements of water balance according to the method of I. I. Polyak and correlation coefficient R it is established that major series are constant. The obtained regularities of variability and degree of interconnections of seasonal elements of the water balance of the Upper Volga basin allow assessing the flow in the years of different water content according to seasonal values of atmospheric precipitation and evaporation.

Basin of the Upper Volga, water balance elements, river flow, atmospheric precipitation, total evaporation, basin water stocks, linear trend.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-05-00193а).

Происходящие в настоящее время изменения климата уже привели в ряде крупных регионов к существенным изменениям водного режима рек. Учитывая большую вероятность продолжения потепления в течение нынешнего столетия, необходимо отметить, что проблема оценки современных и ожидаемых изменений водных ресурсов и водного режима перешла из разряда общих теоретических в совершенно практические.

Основу такого подхода к изучению гидрологических процессов составляет уравнение водного баланса, основанное на законе сохранения материи и энергии, решение которого позволяет оценить соотношение и взаимосвязь отдельных компонентов гидрологического цикла в речном бассейне. Чем детальнее будет изучена оценка пространственно-временной изменчивости речного стока и определяющих его климатических факторов, тем надежнее удастся выявить изменение гидрологического режима водных объектов.

В качестве исходной гидрометеорологической информации использованы данные наблюдений за месячными сум-

мами атмосферных осадков на 11 метеостанциях и за речным стоком на 20 гидрологических постах, находящихся на рассматриваемых частных водосборах бассейна Верхней Волги, за исследуемый многолетний период 1914/1915–2010/2011 годов. Суммарное испарение с поверхности речного бассейна и изменение бассейновых влагозапасов частных водосборов бассейна Верхней Волги за периоды весеннего половодья и межени получены по методике разработанной Г. Х. Исмайловым и В. М. Федоровым [1].

Для выявления пространственно-временной изменчивости речного стока, атмосферных осадков, суммарного испарения, бассейновых запасов влаги, были получены временные ряды сезонных элементов водного баланса бассейна Верхней Волги за период 1914/1915–2010/2011 годов. Для всех рассматриваемых временных рядов определены выборочные оценки основных статистических параметров. В таблице 1 представлены основные статистические параметры временных рядов элементов водного баланса водосбора Иваньковского водохранилища.

Таблица 1

Выборочные оценки основных статистических параметров временных рядов сезонных величин элементов водного баланса водосбора Иваньковского водохранилища за 1914/1915–2009/2010 годы (n = 96 лет), мм

Статистические параметры	Элементов водного баланса							
	Весеннее половодье (IV – VI)				Межень (VII – III)			
	PВ	РВ	ЕВ	±VB	PM	RM	EM	±VM
Среднегодовое значение	358	117	141	-100	466	95	371	0
Стандартное отклонение σ	57	38	39	69	93	49	26	50
Коэффициент вариации C_v	0,16	0,32	0,27	-0,70	0,20	0,51	0,07	-
Коэффициент асимметрии C_s	0,32	0,64	0,54	-1,4	0,40	1,02	0,14	-
Коэффициент автокорреляции $r[1]$	0,15	0,12	0,11	0,16	0,07	0,26	0,20	0,06

Примечание: PВ и РМ – суммарные атмосферные осадки соответственно за период половодья и межени; РВ и RM – речной сток; ЕВ и EM – суммарное испарение; VB и VM – бассейновые запасы влаги.

Анализ изменения речного стока за периоды весеннего половодья и межени по частным водосборам бассейна Верхней Волги показал, что среднегодовое значение стока весеннего половодья составляет 109...149 мм или 9,81...11,8 км³, а среднегодовое значение стока межени – 78...95 мм или 1,48...3,8 км³.

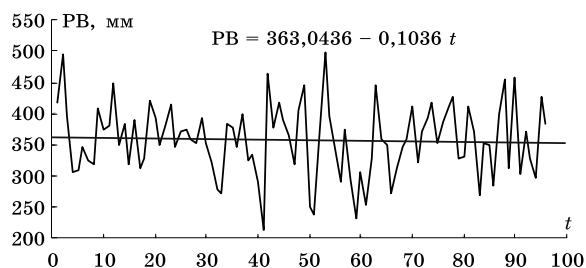
Коэффициент вариации речного стока за период половодья, начиная с частного водосбора Угличского водохранилища постепенно уменьшается с 0,33 и на частном водосборе Нижегородского водохра-

нилища достигает 0,27. Для периода межени изменчивость речного стока также имеет высокое значение и колеблется от 0,45 (частный водосбор Рыбинского водохранилища) и до 0,65 (частный водосбор Угличского водохранилища).

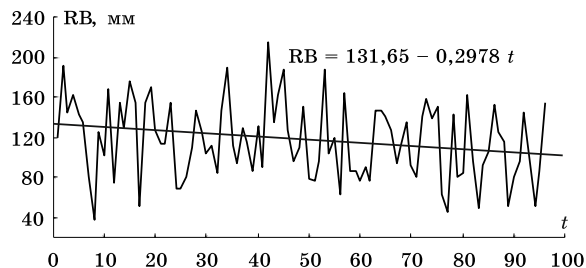
На рисунках 1 и 2 приведены колебания сезонных элементов водного баланса бассейна Верхней Волги для частного водосбора Иваньковского водохранилища. Изменения количества сезонных атмосферных осадков за XX век явно не выражены, график имеет стационарный

характер (математическое ожидание не изменяется во времени). Речной сток межженного периода имеет тенденцию к уве-

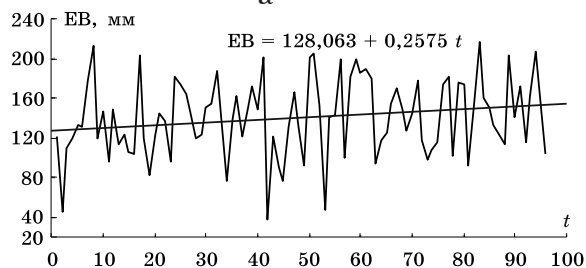
личению, как правило, за счет снижения стока весеннего половодья и повышения температуры воздуха зимнего периода.



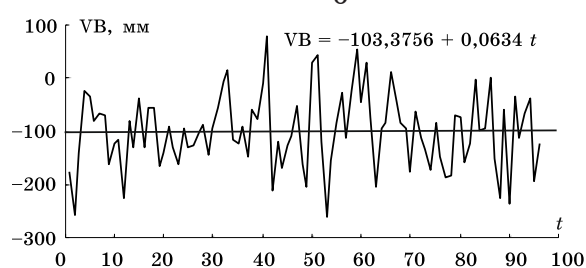
а



б

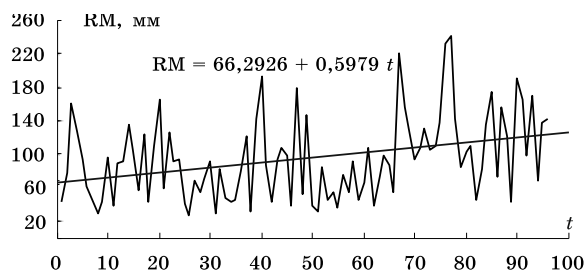


в

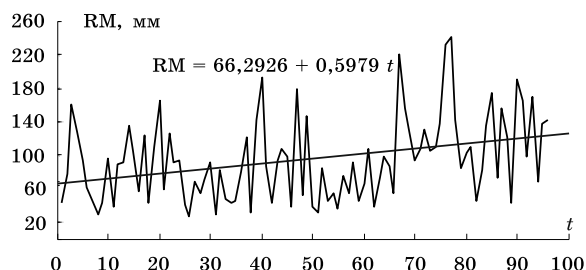


г

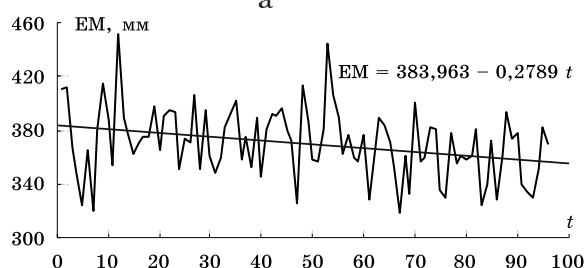
Рис. 1. Графики многолетнего колебания элементов водного баланса периода весеннего половодья частного водосбора Иваньковского водохранилища за период 1914/1915–2009/2010 годов: а – атмосферных осадков; б – речного стока; в – испарения; г – бассейновых запасов влаги



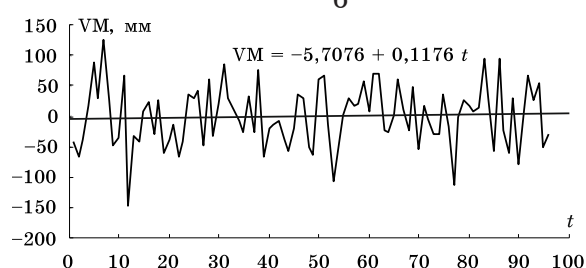
а



б



в



г

Рис. 2. Графики многолетнего колебания элементов водного баланса периода межжени частного водосбора Иваньковского водохранилища за период 1914/1915–2009/2010 годов: а – атмосферных осадков; б – речного стока; в – испарения; г – бассейновых запасов влаги

При изучении динамики колебаний гидрометеорологических величин часто выявляются однонаправленные изменения их величин (тренды) под действием одного или нескольких факторов в течение какого-либо периода.

Для частного водосбора Иваньковского водохранилища наблюдается значимый положительный линейный тренд межженного стока, при увеличении его среднеемноголетнего значения на 57 мм / 96 лет. А для периода весеннего половодья

наблюдается снижение среднемноголетнего значения стока на 28 мм / 96 лет. Аналогичная тенденция характерна и для частного водосбора Угличского водохранилища. Изменение меженного стока и стока периода весеннего половодья составляет соответственно 33 мм / 96 лет и 18 мм / 96 лет.

Для частного водосбора Нижегородского водохранилища характерно увеличение среднемноголетнего значения как меженного стока, так и стока весеннего половодья соответственно на 31 мм / 91 год и 22 мм / 91 год на фоне происходящей сработки бассейновых запасов влаги. Наблюдается положительный линейный тренд. Для частного водосбора Рыбинского водохранилища на фоне увеличения среднемноголетнего значения суммарного испарения происходит снижение речного стока как в период весеннего половодья, так и в период межени.

Важным значением при анализе и оценке изменения речного стока является определение стационарности (нестационарности) и однородности (неоднородности) элементов водного баланса речного бассейна. Нестационарность процесса проявляется в наличии трендов, т. е. неслучайных тенденций к систематическому увеличению или уменьшению значений элементов водного баланса или амплитуды их колебаний относительно среднего значения.

Для обнаружения наличия тренда использованы критерий И. И. Поляка и коэффициент корреляции R между значениями временного ряда элементов водного баланса и порядковыми номерами его членов.

По методике И. И. Поляка, основанной на проверке статистической значимости параметров тренда, рассчитывается уравнение линейной регрессии следующего вида:

$$Y(t) = a_0 + a_1 t, \quad (1)$$

где $Y(t)$ – значения исследуемых водных ресурсов (речного бассейна или бассейна моря), t – порядковый номер наблюдаемой величины, a_0 и a_1 – коэффициенты регрессии.

Для проверки гипотезы о наличии линейного тренда по методике И. И. Поляка требуется выполнение следующих условий:

$$\bar{\sigma}^2 < \sigma^2, |a_1| > 2 \frac{\sigma^2}{\bar{\sigma}^2}, \quad (2)$$

где σ^2 – дисперсия наблюдаемых величин от среднего значения; $\bar{\sigma}^2$ – дисперсия отклонения наблю-

денных величин от линии тренда, которая определяется так:

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma^2 (1 - R^2),$$

где R – коэффициент корреляции между наблюдаемой величиной и ее порядковым номером; σ_{a_1} – среднее квадратичное отклонение регрессионного коэффициента a_1 , которое определяется по следующей зависимости:

$$\sigma_{a_1} = \sigma \sqrt{\frac{12}{n(n-1)}},$$

где n – число членов временного ряда.

Если условия (2) не выполняются, то линейный тренд является незначимым с вероятностью 5% [2]. Для обнаружения тренда использовался коэффициент корреляции R между значениями временного ряда элементов водного баланса и порядковыми номерами членов этих рядов.

Результаты расчетов показали, что при уровне значимости 5 % большинство рядов являются стационарными (табл. 2). Нестационарность выявлена во временных рядах меженного стока частного водосбора Ивановского водохранилища по критерию И. И. Поляка и коэффициенту корреляции R между значениями временного ряда и порядковыми номерами его членов.

Для временного ряда меженного стока частного водосбора Ивановского водохранилища при уровне значимости 5 % удвоенная средняя квадратичная погрешность коэффициента корреляции $2\sigma_R = 0,182$ значительно меньше коэффициента корреляции, равного 0,34, следовательно признается альтернативная гипотеза неоднородности во времени, а значит и нестационарности меженного стока бассейна Верхней Волги для частного водосбора Ивановского водохранилища. Таким образом, линейный тренд в ходе многолетних колебаний меженного стока за период XX века статистически значим (уровень надежности 95 %) и отличается от нуля. На этом основании можно сделать вывод, что для многолетних колебаниях меженного стока характерен положительный статистически значимый линейный тренд, поэтому рассматриваемый ряд наблюдений неоднородный, то есть отклоняется нулевая гипотеза однородности данных наблюдений.

При исследовании нестационарности рядов элементов водного баланса бассейна Верхней Волги была оценена однородность средних значений и дисперсий

Оценка значимости линейного тренда сезонных элементов водного баланса бассейна Верхней Волги

Элементы водного баланса	Критерии оценки тренда					
	По коэффициенту корреляции				По методике И. И. Поляка	
	R	σ_R	$2\sigma_R$	$K_D \geq 2$	$\bar{\sigma}^2 < \sigma^2$	$ a_1 > 2\sigma_{a_1}$
Частный водосбор Ивановского водохранилища						
PB	-0,05	0,102	0,204	0,49	3244 < 3252	$ -0,10 < 0,54$
RB	-0,21	0,098	0,196	2,24	1366 < 1435	$ -0,29 < 0,44$
EB	0,18	0,099	0,198	1,87	1442 < 1494	$ 0,25 < 0,45$
VB	0,02	0,103	0,206	0,25	4810 < 4814	$ 0,06 < 0,60$
PM	0,06	0,102	0,204	0,59	8624 < 8656	$ 0,20 < 0,70$
RM	0,34	0,091	0,182	3,75	2117 < 2394	$0,59 > 0,50$
EM	-0,30	0,093	0,186	3,22	607 < 667	$ -0,27 < 0,37$
VM	0,06	0,102	0,204	0,64	2472 < 2483	$ 0,11 < 0,51$
Частный водосбор Угличского водохранилища						
PB	-0,05	0,102	0,204	0,55	2726 < 2735	$ -0,10 < 0,52$
RB	-0,16	0,100	0,200	1,64	340 < 350	$ 0,18 < 0,31$
EB	0,16	0,100	0,200	1,62	1537 < 1578	$ 0,18 < 0,46$
VB	0,09	0,102	0,204	0,92	4461 < 4501	$ 0,11 < 0,59$
PM	-0,07	0,102	0,204	0,77	9756 < 9817	$ 0,10 < 0,72$
RM	0,17	0,099	0,198	1,75	509 < 525	$ 0,34 < 0,35$
EM	-0,21	0,098	0,196	2,25	603 < 634	$ -0,15 < 0,36$
VM	0,06	0,102	0,204	0,66	8608 < 8647	$ 0,08 < 0,70$
Частный водосбор Рыбинского водохранилища						
PB	-0,01	0,105	0,210	0,10	2790,2 < 2790,4	$ -0,02 < 0,56$
RB	-0,19	0,101	0,202	1,91	998 < 1037	$ -0,23 < 0,43$
EB	0,17	0,102	0,204	1,71	512 < 529	$ 0,15 < 0,37$
VB	-0,03	0,105	0,210	0,32	2550 < 2553	$ -0,06 < 0,54$
PM	0,04	0,105	0,210	0,41	6243 < 6255	$ 0,13 < 0,68$
RM	-0,17	0,102	0,204	1,70	1758 < 1813	$ -0,28 < 0,50$
EM	0,25	0,099	0,198	2,60	422 < 451	$ 0,20 < 0,35$
VM	-0,13	0,103	0,206	1,31	1559 < 1589	$ -0,20 < 0,48$
Частный водосбор Нижегородское водохранилища						
PB	-0,01	0,105	0,210	0,15	2279 < 2304	$ -0,02 < 0,53$
RB	0,16	0,103	0,206	1,58	1554 < 1570	$ 0,24 < 0,48$
EB	-0,03	0,105	0,210	0,33	646 < 653	$ -0,03 < 0,39$
VB	0,10	0,104	0,208	0,97	3857 < 3900	$ 0,23 < 0,60$
PM	-0,12	0,104	0,208	1,17	6253 < 6321	$ -0,36 < 0,68$
RM	0,18	0,102	0,204	1,84	2270 < 2294	$ 0,34 < 0,53$
EM	-0,29	0,096	0,192	3,07	945 < 954	$ -0,34 < 0,43$
VM	0,23	0,099	0,198	2,40	1574 < 1590	$ 0,35 < 0,48$

Примечание: R – коэффициент корреляции между значениями временного ряда элементов водного баланса и порядковыми номерами членов этих рядов; σ_R – средняя квадратическая погрешность коэффициента корреляции R ; K_D – коэффициент достоверности коэффициента корреляции.

рассматриваемых характеристик. При прогнозировании в качестве одного из основных допущений предполагалась физическая и статистическая однородность (неоднородность) многолетних колебаний основных составляющих водного баланса за достаточно продолжительный период времени. Проверка однородности выборочных статистических параметров осуществлялась с помощью тестовых критериев Стьюдента и Фишера.

Для оценки стационарности временных рядов использованы разностные интегральные кривые элементов водного баланса. Разностные интегральные кривые разбивались на две части различной продолжительности. Для каждой части

определялись расчетные средние значения и дисперсии, по которым рассчитывались статистики критериев Стьюдента t и Фишера F . Критические значения критериев Стьюдента t_α и Фишера F_α определялись при уровне значимости $\alpha = 5\%$. Результаты оценки однородности свидетельствуют, что для частных водосборов Ивановского, Угличского и Нижегородского водохранилищ характерна неоднородность средних значений годового и межлетнего стока, а неоднородность дисперсий этих элементов наблюдается только для частного водосбора Угличского водохранилища. Средние значения рядов годового и межлетнего суммарного испарения бассейна Верхней Волги неоднородны, но для остальных элементов

условие однородности выполняется.

Исследована структура межрядных связей элементов водного баланса Верхней Волги. Для частного водосбора Ивановского водохранилища за исследуемый период характерна тесная корреляционная связь между атмосферными осадками и речным стоком в период межени ($r = 0,70$), аналогичная связь проявляется для этих же годовых значений элементов (r

$= 0,70$). Тесная обратная связь обнаруживается и между атмосферными осадками и суммарным испарением ($r = -0,73$) и суммарным испарением и речным стоком ($r = -0,93$) в период весеннего половодья. Анализ внутрирядных связей показал, что обнаруживается умеренная связь между стоком и атмосферными осадками ($r = 0,44$) в период весеннего половодья (табл. 3).

Таблица 3

Матрица парных коэффициентов корреляции элементов водного баланса частного водосбора Ивановского водохранилища за период 1914/1915–2009/2010 годов

ЭВВ	РВ	R(IV-VI)	ЕВ	VB	PM	RM	EM	РГ	RG	EG	VT
РВ	1,00	0,44	-0,73	-0,99	0,60	0,14	0,59	0,58	0,39	0,29	-0,54
R(IV-VI)		1,00	-0,93	-0,33	0,11	-0,08	0,22	0,20	0,57	-0,40	0,02
ЕВ			1,00	0,65	-0,33	-0,00	-0,41	-0,38	-0,59	0,18	0,20
VB				1,00	-0,61	-0,16	-0,59	-0,59	-0,34	-0,36	0,57
PM					1,00	0,70	0,54	0,96	0,60	0,53	-0,91
RM						1,00	-0,29	0,65	0,77	-0,05	-0,45
EM							1,00	0,48	-0,10	0,72	-0,64
РГ								1,00	0,70	0,52	-0,94
RG									1,00	-0,30	-0,36
EG										1,00	-0,79
VT											1,00

Выводы

Проведенный анализ изменчивости элементов водного баланса в бассейне Верхней Волги за 96 лет наблюдений позволил выявить, для периода межени и года в целом характерно увеличение речного стока соответственно на 56 мм / 96 лет и 30 мм / 96 лет, сток весеннего половодья снижается на 28 мм / 96 лет. За исследуемый период времени прослеживалось не постепенное увеличение речного стока в период межени, а резкое (скачкообразное) с конца 1970-х годов, половодье более сглажено и растянуто по времени.

При оценке значимости линейного тренда сезонных элементов водного баланса по методике И. И. Поляка и по коэффициенту корреляции R установлено, что большинство рядов являются стационарными. Нестационарность выявлена во временных рядах меженного стока частного водосбора Ивановского водохранилища по критерию И. И. Поляка и коэффициенту корреляции R между значениями и порядковыми номерами членов ряда.

Выявленные закономерности изменчивости и степени взаимосвязи сезонных элементов водного баланса бассейна Верхней Волги, позволяют по сезонным величинам атмосферных осадков и испарения оценить сток в годы различной водности.

1. Исмайылов Г. Х., Федоров В. М. Межгодовая изменчивость и взаимосвязь элементов водного баланса бассейна р. Волги // Водные ресурсы. – 2008. – Т. 35. – № 3. – С. 259–276.

2. Шикломанов И. А. Водные ресурсы России и их использование. – СПб.: Гос. гидрол. институт, 2008. – 600 с.

Материал поступил в редакцию 03.09.14.

Федотова Ольга Александровна, аспирантка

Тел. 8-925-288-59-57

E-mail: olg21796677@yandex.ru

Муращенкова Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидрология, гидрогеология и регулирование стока»

Тел. 8 (495) 976-17-45

E-mail: splain75@mail.ru