



Институт водных проблем  
Российской академии наук

Кафедра гидрологии суши  
МГУ им. М.В. Ломоносова



Сборник трудов  
Второй открытой конференции  
Научно-образовательного центра  
**Ресурсы и качество вод суши:  
Оценка, прогноз и управление**



20 - 21 декабря 2012 года  
Москва, Россия



Москва 2012



**Институт водных проблем  
Российской Академии наук**



**Кафедра гидрологии суши  
МГУ им. М.В. Ломоносова**

**Сборник трудов  
Первой открытой конференции  
Научно-образовательного центра**

# **Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление**

**20 – 21 декабря 2012 г.  
Москва, Россия**

**Ответственный редактор – д.ф.-м.н. А.Н. Гельфан**

**Материалы подготовлены  
М.В. Александровичем, Е.В. Белозеровой**

**При финансовой поддержке:  
Российской Академии наук  
Российского фонда фундаментальных исследований**

**Москва 2012**

Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление. Сборник трудов Второй открытой конференции Научно-образовательного центра. 20 – 21 декабря 2012 г. / М.: ИВП РАН, Кафедра гидрологии МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012, 274 с.

В сборник включены материалы второй открытой конференции Научно-образовательного центра «Ресурсы и качество воды суши: оценка прогноз и управление», объединяющего специалистов Института водных проблем РАН и кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Для студентов, аспирантов, преподавателей, научных сотрудников профильных учреждений.

УДК 556.5

© 2012 ИВП РАН

© 2012 Кафедра гидрологии суши ГФ МГУ

Изображение, использованное для оформления обложки, было взято в сети Интернет и принадлежит его законному правообладателю.



## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ И ИЗМЕНЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПРЕДЕЛАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Н.Л. Фролова<sup>1</sup>, Р.Г. Джамалов<sup>2</sup>, М.И. Игонина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; <sup>2</sup>Институт водных проблем Российской академии наук, г. Москва, Россия  
frolova\_nl@mail.ru, dzhamal@aqua.laser.ru, mashka\_@bk.ru

**Введение.** В настоящее время назрела необходимость переоценки возобновляемых водных ресурсов (естественных ресурсов подземных и поверхностных вод) в связи с изменением климатических характеристик, влияющих на формирование элементов водного баланса речных бассейнов. Изучение современных особенностей формирования подземной и поверхностной составляющих речного стока позволяет судить о распределении общих водных ресурсов европейской территории России (ЕТР) в их динамике под влиянием нестационарного климата.

Выполненная на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ и Институте водных проблем РАН комплексная оценка водных ресурсов включала:

- разработку методики оценки величины и изменения водных ресурсов с использованием статистического анализа и ГИС-технологий;
- определение средних значений годового и сезонного стока со статистическим анализом рядов наблюдений;
- анализ основных факторов изменения водных ресурсов;



- определение пространственно-временных характеристик современных водных ресурсов и составление серии карт их распределения;
- оценку масштабов и направленности изменения водного режима и соотношений источников питания;
- расчет удельной водообеспеченности и современной нагрузки на водные ресурсы.

В настоящей статье основной упор сделан на методические стороны данной работы.

**Исходные данные и методы анализа.** Исходными данными для оценки и анализа послужили материалы Государственного водного кадастра, российские и международные базы гидрометрических и климатических данных. Собраны материалы примерно по 300 водосборам ЕТР, выбранным в качестве репрезентативных для пространственно-временного анализа изменений условий формирования и динамики водных ресурсов с 1935 по 2005 гг.

Для каждого гидрометрического поста расчеты проводились для трех периодов: весь период имеющихся наблюдений, за 1940–1969 гг. и с 1970 по 2005 г. Выбор 1970 г. в качестве порогового обусловлен началом изменения климатических условий в эти годы для большей части ЕТР [1]. Кроме того, выделенные интервалы в 30 и более лет соответствуют таким временным интервалам, когда выявляемые изменения в метео- и гидрологических рядах наблюдений могут рассматриваться как репрезентативные [2].

Для выделенных интервалов наблюдений рассчитаны средние, минимальные и максимальные значения, средние квадратические отклонения, а также непараметрические критерии тренда Спирмена для выяснения наличия монотонного тренда (возрастающего или убывающего) у исследуемых рядов. Критерий использует оценку коэффици-

ента корреляции между рангами членов ряда и номерами соответствующих лет [3].

Для проверки статистической однородности исследуемых рядов каждый из них разбивался на два более коротких. Первый ряд  $n_1$  состоял из последовательных значений с 1935 по 1969 г., второй ряд  $n_2$  – из оставшихся наблюдений с 1970 г. Длина всего ряда наблюдений  $n$  составляет сумму  $n_1$  и  $n_2$ . Полученные для  $n_1$  стандартные оценки среднего  $M$ , среднего квадратического отклонения  $S$  сравнивались с аналогичными оценками, полученными для второго ряда. Для проверки статистической однородности исследуемых рядов с точки зрения их дисперсии, характеризующей амплитуду колебаний характеристик относительно их средних значений, использовался критерий Фишера. Сравнение средних значений  $M_1$  и  $M_2$ , полученных для первой и второй половин ряда, выполнено с помощью параметрического критерия Стьюдента. Кроме того, для оценки средней скорости увеличения или уменьшения (для отрицательного тренда) исследуемой переменной на рассматриваемом отрезке времени использовался коэффициент линейного тренда. На основе статистического анализа получены количественные оценки выявленных изменений, достоверность которых основана на дальнейшем географическом анализе и обобщении. Пример результатов расчетов средних значений, средних квадратических отклонений, статистических критериев Спирмена  $r_s$ , Стьюдента  $t(M)$  и Фишера  $f(D)$  для р.Дон приведен в табл. 1.

Региональная количественная оценка подземного притока в реки наиболее эффективно может быть получена в результате расчленения речного стока на подземную и поверхностную составляющие. Расчленение общего речного стока на генетические составляющие может быть произведено аналитическими расчетами или расчленением гид-

рографа рек по гидрометрическим данным о речном стоке. Сущность этого метода в следующем. В водном режиме рек, как правило, можно выделить отдельные периоды или фазы, в зависимости от природных условий различные по продолжительности и степени устойчивости, когда речной сток полностью или преимущественно формируется подземным стоком (меженные периоды). Расходы воды рек в такие периоды могут быть приняты за суммарный подземный приток в реку со всей водосборной площади выше измерительного створа. В этих условиях гидрометрическая оценка речного стока является прямым методом количественной оценки величины подземного притока в реку [4-5].

Табл. 1. Оптимальный период осреднения для расчета меженного (подземного) стока

Бассейн	Период осреднения для расчета меженного стока
Север ЕТР	Ноябрь-март
Верхняя Волга	Декабрь-февраль
Ока	Декабрь-март
Кама	Ноябрь-март
Нижняя Волга, Дон	Июль-сентябрь, декабрь-февраль
Урал	Декабрь-март
Терек	Декабрь-февраль
Кубань	Декабрь-январь, август-сентябрь
Днепр	Декабрь-февраль, июль – сентябрь
Кума	Декабрь-январь, август-сентябрь

В зависимости от условий формирования речного стока и устойчивости межени за основной показатель подземного притока в реки принимаются характерные расходы воды рек в период низкого речного стока: средний за весь период зимней или летней межени, минимальные расходы воды за тридцатидневные, десятидневные или суточные периоды межени. В качестве характеристики подземной со-



ставляющей речного стока принят меженный сток, рассчитываемый как среднемесячные расходы воды за маловодные месяцы.

Выбор периода осреднения для различных регионов проводился на основе генетического расчленения гидрографов рек по методике Б.И. Куделина [6] и сравнения полученной величины подземной составляющей с различными характеристиками меженного стока (табл. 2). Современные компьютерные технологии позволяют автоматизировать решение данной задачи. Все расчеты проводились для гидрологического года (1.11-31.10). Период осреднения определялся путем построения различных регрессионных зависимостей и выбора наиболее оптимального варианта (с точки зрения наилучшей корреляционной связи) (рис. 1). Далее гидрологическая информация подвергалась статистической обработке с помощью стандартных пакетов Statistica и Excel, а пространственный анализ гидрологических характеристик – с помощью пакета ArcViewGis 9.3. В результате проведенных расчетов для целого ряда рек ЕТР была проведена:

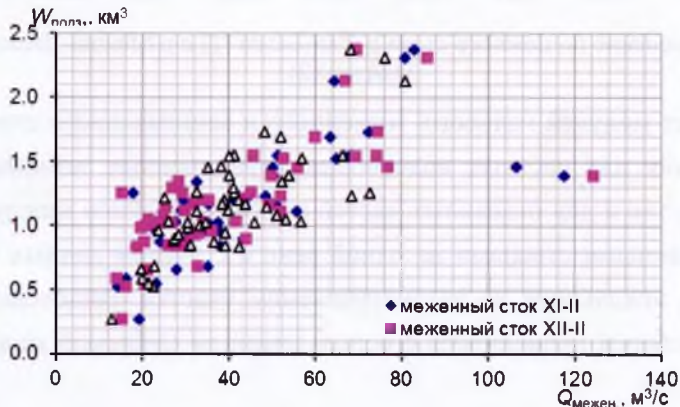


Рис. 1. Пример связи объема подземного стока (определен по методу Б.И. Куделина) и средних меженных расходов воды (р. Мокша – Шевелевский Майдан)

- 1) Оценка временной изменчивости подземной составляющей стока рек ЕТР (пример - рис 2);
- 2) Оценка связи подземной составляющей стока и величины меженного стока, определенного за различные периоды (рис. 1);
- 3) Оценка изменения соотношения источников питания рек.

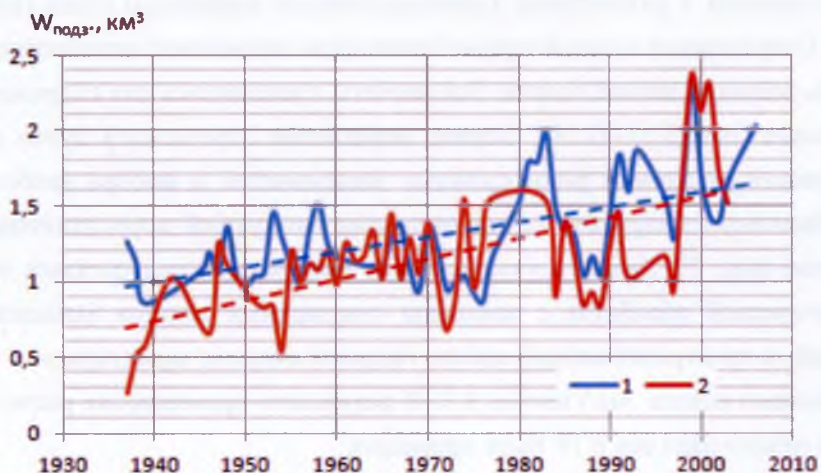


Рис. 2. Изменение подземного стока р.Оки-Белев (1) и р.Мокши-Шевелевский Майдан (2)

Расчет модулей годового, меженного и минимального стока проводился как для частных водосборов, ограниченных замыкающими створами, так и для отдельных частей речных бассейнов между двумя расположенными створами на одной реке и с учетом данных о стоке притоков, впадающих на рассматриваемом участке. Выделение частных водосборов проводилось с использованием цифровой модели рельефа SRTM.

Используемое осреднение (годовые, меженные и минимальные месячные расходы воды) позволяет производить подобные расчеты без учета изменения русловых запасов и времени добегания. Построе-

ние карт различных характеристик проводилось с помощью ГИС-технологий. Пример рабочего варианта карт представлен на рис. 3.

В дальнейшем построенные в автоматическом режиме карты генерализировались. В случае значительных отклонений модулей стока для отдельных водосборов или их частей информация проверялась и уточнялась. В конечном итоге получен целый ряд карт годового, межennaleго и минимального стока (рис. 3-4). Подробный анализ данных карт приведен в работах [2, 7-9].

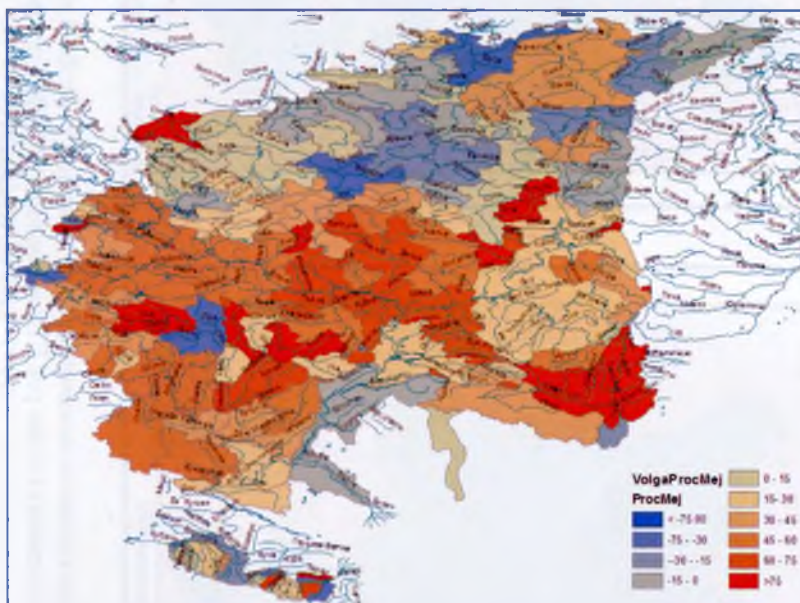


Рис. 3. Рабочая карта изменения межennaleго стока рек ЕТР

ГИС-технологии также позволяют упростить систему перехода от изолиний значений стока к осредненным данным по крупным речным бассейнам и субъектам РФ. Для этого применяются специальные модули ArcViewGis 9.3. Для примера в табл. 2 приведены среднемноголетние ресурсы речного стока и их использование по бассейнам крупных рек ЕТР.



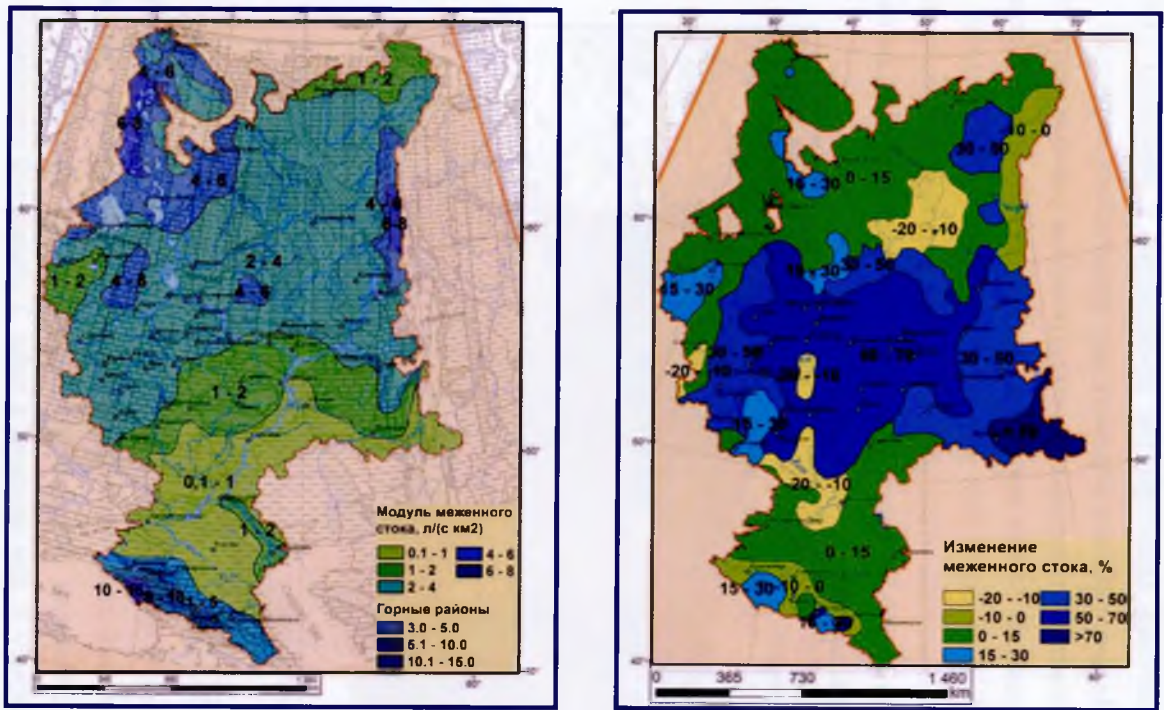


Рис. 4. Модуль среднего межennaleго стока за период 1970–2005 гг. (слева) и изменение межennaleго (подземного) стока рек ЕТР за период 1970–2005 гг. по сравнению с периодом 1935–1969 гг. (справа) [7]

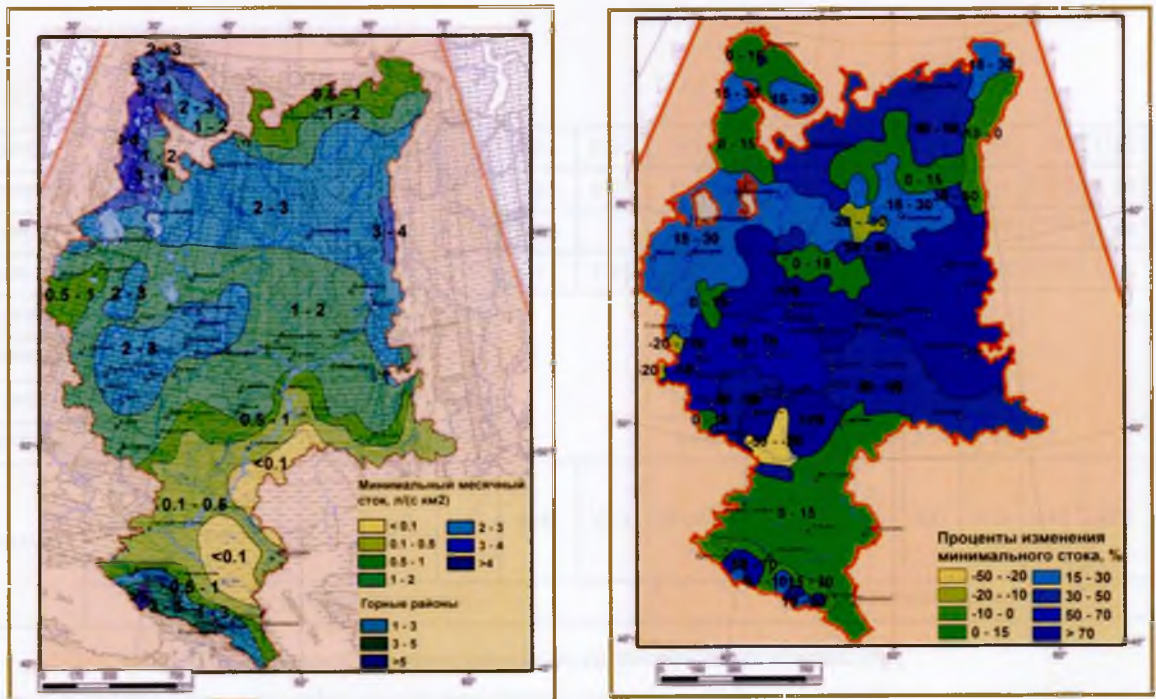


Рис. 5. Модуль минимального месячного стока рек ЕТР (1970–2005 гг.) (слева) и его изменение за период 1970–2005 гг. по сравнению с 1935–1969 гг. (справа) [7]



Табл. 2. Статистические характеристики рядов среднегодового и среднего межennaleго стока р. Дон (красным выделены случаи статистически достоверных изменений)

Характеристика	Среднегодовой сток							Средний межennaleго сток						
	Среднее	Среднее квадр. отклонение	$r_s$	$t(s)$	$r(I)$	$t(M)$	$f(D)$	Среднее	Среднее квадр. отклонение	$r_s$	$t(s)$	$r(I)$	$t(M)$	$f(D)$
р. Дон - Задонск	129	27	0,06	0,33	0,01			64,0	13,5	<b>0,41</b>	2,56	0,37		
р. Дон - Лиски	255	71	0,02	0,10	0,19			106,8	32,8	<b>0,47</b>	3,08	0,04		
р. Дон - Павловск	292	79	0,02	0,09	0,19			123,3	37,8	<b>0,49</b>	3,21	0,04		
р. Дон - Калач	580	196	0,10	0,55	0,19			360,9	11,7	<b>0,58</b>	4,09	0,15		
р. Дон - Задонск	123	36	0,06	0,36	0,41	0,11	1,68	83,7	20,2	<b>0,61</b>	4,40	0,68	<b>4,78</b>	<b>2,24</b>
р. Дон - Лиски	241	71	-0,05	-0,26	0,32	0,83	1	150,6	35,8	<b>0,58</b>	4,09	0,52	<b>5,34</b>	1,19
р. Дон - Павловск	334	270	0,08	0,46	0,3	0,87	0,57	178,7	52,6	<b>0,63</b>	4,62	0,58	<b>5,06</b>	1,94
р. Дон - Калач	540	147	0,22	1,29	0,22	0,95	0,57	382,1	13,3	<b>0,68</b>	5,34	0,59	<b>7,07</b>	1,30

Табл. 3. Ресурсы поверхностных и подземных вод и их использование по бассейнам основных рек ЕТР

Бассейн реки	Площадь водосбора, тыс. км <sup>2</sup>	Естественные ресурсы, км <sup>3</sup> /год / изменение по сравнению с 1940-69гг., %			Водоотбор, км <sup>3</sup> /год, после 2000-х	Отношение объема водоотбора к естественным ресурсам, %		
		среднего годового речного стока	подземных вод	минимальных месячных		среднего годового речного стока	подземных вод	минимальных месячных
Сев. Двина	360	100.1/1	37.9/1	23.0/13	0.29	0.2	1	1.3
Мезень	79.65	19.9/-1	6.6/5	4.1/6	0.04	0.2	1	1
Печора	322	147.2/17	40.2/-12	21.2/-7	0.28	0.2	1	1.3
Волга	1380	260.1/7	192.2/15	184.4/23	2.44	1	1.3	1.3
Ока	245	41.1/16	25.0/63	22.3/64	0.65	1.6	2.6	3
Дон	422.44	21.2/-14	18.1/27	14.4/59	1.75	8	10	12
Хопер	61.1	4.0/23	2.2/150	1.5/550	0.01	0.3	0.5	0.7
Кубань	57.9	14.3/3	10.5/7	5.3/8	4.58	32	44	86
Терек	37.42	7.2/-8	4.6/7	3.7/0	3.91	54	85	106



**Выводы.** Итогом работы является целый ряд методических и практических результатов. На основе современных методов статистического анализа и ГИС-технологий выполнен совместный анализ изменения характеристик годового, межennaleго и минимального месячного стока для речных бассейнов Европейской территории России за весь период наблюдений и за сопоставимые по продолжительности периоды интервалы 1935-1969 и 1970-2005 годы. Для этой цели созданы соответствующие базы данных по среднемесячным расходам воды примерно по 300 гидрологическим постам ЕТР. Даны оценки изменения различных характеристик стока за последние 35 лет. Проведена переоценка естественных ресурсов поверхностных и подземных вод за период 1970-2005 гг. с построением соответствующих карт. Для оценки подземной составляющей стока использовался метод генетического расчленения гидрографов по методике Б.И.Куделина.

### Литература

1. Водные ресурсы России и их использование – под ред. И.А. Шикломанова, 2008. ГГИ, Санкт Петербург. 598 с.
2. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л. и др. Влияние изменений климата на сток и водный режим рек ЕТР // Проблемы безопасности в водохозяйственном комплексе России. 2010. Краснодар: ООО «Авангард плюс». С. 106-116.
3. Христофоров А. В. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Изд-во МГУ, 1988. 131 с.
4. Оценка подземного притока в реки и естественных ресурсов подземных вод в условиях нарушения режима речного стока (методические рекомендации). Л.: Гидрометеиздат, 1974. 53 с.
5. Методические рекомендации по оценке подземного притока в реки. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 94 с.
6. Куделин Б. И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1960. 344 с.
7. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Кричевец Г.Н., Сафронова Т.И., Киреева М.Б., Игонина М.И. Формирование современных ресурсов поверхностных и подземных вод Европейской части России // Водные ресурсы. Том 39. № 6. 2012. С. 571-589.

8. Frolova N., Agafonova S., Nesterenko D. Water and ice regimes of the rivers of European Russia under climate change // *Hydro-climatology: Variability and Change*. IAHS Publ. 344, 2011. Pp. 63-68.
9. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Сафронова Т.И. Изменения режима и величины подземного стока рек Европейской территории России под влиянием нестационарного климата // *Ресурсы подземных вод: Современные проблемы изучения и использования*. М.:МАКС Пресс, 2010. С. 83-93.