



Р.Г. Джамалов
д-р геол.-мин. наук, академик РАН
профессор
Институт водных проблем РАН
заведующий лабораторией
dzhamal@aqua.laser.ru



Н.Л. Фролова
д-р геогр. наук
МГУ им. М.В. Ломоносова
географический факультет
доцент кафедры гидрологии
frolova_n@mail.ru



М.Б. Киреева
канд. геогр. наук
МГУ им. М.В. Ломоносова
научный сотрудник



А.А. Телегина
Институт водных проблем РАН
научный сотрудник



Е.А. Телегина
Институт водных проблем РАН
научный сотрудник

Современные ресурсы поверхностных и подземных вод бассейна Оки

Выполнена региональная оценка ресурсов поверхностных и подземных вод бассейна Оки. Показаны их изменения под влиянием климатических вариаций последних десятилетий. Установлено существенное изменения соотношений ресурсов поверхностных и подземных вод. Увеличение питания подземных вод в современных климатических условиях привело к росту их среднегодовых и минимальных месячных естественных ресурсов

Performed a regional assessment of surface and groundwater resources of the basin of the Oka. Showing their changes under the influence of climatic variations of the last decades. Essential changes of ratios of surface and groundwater resources. Increase of groundwater recharge in the current climatic conditions resulted in growth of their multi-annual average and minimum monthly natural resources

Ключевые слова: подземные воды, водные ресурсы, климатические изменения, водообеспеченность
Keywords: ground water, water resources, climate change, water availability

Проблема обеспечения водными ресурсами особенно остро стоит в населенных и промышленно развитых регионах центра Европейской части России, к которому относится бассейн Оки. В его пределах частично или полностью расположены 14 субъектов РФ, непо-

средственно на Оке – ряд крупных городов и промышленных центров с существенным забором воды: Орел (318 тыс. чел.), Калуга (325 тыс. чел.), Рязань (528 тыс. чел.), Нижний Новгород (1255 тыс. чел.) и др.

Ока – самый крупный правый приток Волги, протекает в двух природных зонах – в зоне

Современные естественные ресурсы пресных подземных вод бассейна Оки и их изменения по сравнению с предшествующим периодом

Таблица 1

Река/пост	W _{подз} км ³ /год		Изменение, %	C _v		Изменения, %
	1946/1977	1978/2010		1946/1977	1978/2010	
Ока/Вендереево	0,03	0,05	50	0,330	0,270	-18
Ока/Костомарово	0,30	0,40	36	0,275	0,291	6
Ока/Белев	1,23	1,86	52	0,239	0,337	41
Ока/Калуга	4,36	6,44	48	0,329	0,158	-52
Ока/Кашира	5,53	7,87	42	0,384	0,354	-8
Ока/Половское	9,35	13,96	49	0,196	0,203	4
Ока/Касимов	11,83	16,04	36	0,307	0,419	37
Ока/Муром	14,51	20,70	43	0,200	0,245	22
Ока/Горбатов	20,19	29,42	46	0,483	0,317	-34
Крома/Черкасская	0,05	0,08	71	0,262	0,268	2
Цоп/Новолуние	0,04	0,06	71	0,251	0,167	-33
Оптуха/Платово	0,04	0,06	61		0,850	
Зуша/Новосиль	0,16	0,22	42		0,256	
Зуша/Мценск	0,55	0,81	48		0,158	
Жиздра/Дубровка	0,15	0,23	51	0,321	0,243	-24
Угра/Товарково	1,36	1,84	35	0,305	0,264	-14
Протва/Спас-Загорье	0,29	0,48	67	0,207	0,149	-28
Москва/Звенигород	0,61	1,28	109	0,243	0,206	-15
Искона/Новинки		0,08	0,230	0,174	-24	
Истра/Павловская Слобода		0,46	0,246	0,218	-11	
М. Истра/Киселево		0,06	0,377	0,234	-38	
Мокша/Темников	0,54	1,14	112	0,213	0,176	-17
Мокша/Шевелевский Майдан	1,09	1,87	71	0,199	0,151	-24
Цна/Княжево	0,51	1,07	111	0,336	0,288	-14
Челновая/Пудовкино	0,01	0,02	135	0,319	0,292	-9
Б. Ломовис/Рождественское	0,00	0,0179	0,103	0,203	97	
Теша/Новоселки	0,01	0,03	177	0,511	0,651	27
Теша/Натальино	0,39	0,56	46	0,362	0,244	-33
Ушна/Новлянская	0,11	0,16	43	0,184	0,189	3
Клязьма/Владимир	1,52	2,21	46	0,256	0,295	15
Клязьма/Ковров	2,42	3,46	43	0,263	0,263	0
Воря/Мишнево	0,12	0,22	80	0,421	0,221	-48
Нерль/Кибергино	0,34	0,48	43	0,928	0,464	-50

смешанных, широколиственных лесов и лесостепной зоне, характерной для правобережья нижнего течения реки. Общая площадь водосбора 245 тыс. км², длина реки 1500 км. Бассейн вытянут с запада на восток и располагается в умеренном климатическом поясе. Средняя температура января в пределах бассейна от -10 до -12 °С, июля – от +18 до +20 °С. Средний годовой слой осадков варьируется от 650 мм на юго-востоке до 750 мм на западе бассейна.

Современные климатические изменения по-разному влияют на подземную составляющую речного стока. В основе оценки ресурсов пресных ПВ и степени их изменения для отдельных территорий лежит региональный анализ многолетних колебаний межлетнего речного стока, отражающего подземную составляющую общего стока рек.

Речной сток в бассейне Оки практически не регулируется искусственными сооружениями и может считаться условно естественным. Исключение составляет лишь бассейн р. Москвы с 1213 действующими водохранилищами и прудами, 5 из которых имеют объем более 100 млн м³ и используются для частичного водоснабжения Москвы.

По данным ВНИИГМИ МЦД в бассейне Оки в настоящий момент действует около 90 гидрологических постов. Однако не все из них обладают репрезентативными и полными рядами наблюдений, поэтому для пространственно-временного анализа и оценки изменения ресурсов ПВ использовались данные по 34 постам. Замыкающим створом, отражающим суммарный сток бассейна, служит пост города Горбатов с площадью водосбора 244 тыс. км², опорный для всего бассейна. Ока обладает развитой гидрографической сетью, в нее впадает более 30 притоков, 14 из которых имеют длину более 200 км.

Особенности формирования ресурсов подземных и поверхностных вод

Общее увеличение водности в Волжском бассейне подтверждается результатами многих исследователей (Водные ресурсы России, 2008; Георгиевский; Семенов В.А., и др. 2003). В бассейне Оки также наблюдается общее увеличение водности за период инструментальных наблюдений. Так, колебания среднегодовых расходов воды Оки в Горбатове в 1930-х гг. составляли 1000–1200 м³/с, тогда достигали уже 1300–1400 м³/с (как в 2000-х гг.). Среднее увеличение расходов воды за 1930–2010 гг. при аппроксимации многолетних колебаний линейным трендом составляет 40 м³/с за 10 лет.

Таким образом, общие водные ресурсы в бассейне возрастают на 1,24 км³ за 10 лет.

Если говорить о подземной составляющей водных ресурсов, то тенденции к увеличению проявляются здесь в еще большей степени: около 2,2 км³ за 10 лет за 1930–2010 гг.

Для оценки вклада поверхностной и подземной составляющей в суммарный речной сток используется целый ряд соотношений. В гидрологии самым широко используемым подобным показателем служит коэффициент естественной зарегулированности стока, представляющий собой отношение базисного стока к суммарному годовому стоку реки. Под базисным стоком в данном случае понимается площадь под гидрографом стока, отсекаемая среднегодовым значением.

Изменения коэффициента естественной зарегулированности в бассейне Оки ярко отражают увеличение роли базисного стока в суммарном годовом стоке в бассейне Оки. С 1930 по 2010 гг. этот показатель возрос примерно в 1,5 раза: если в 1930 гг. он составлял около 0,55, то в 2000 гг. эта величина уже достигает 0,75–0,8. Связь коэффициента естественной зарегулированности стока с долей подземного стока в суммарном речном стоке носит очень тесный характер, коэффициент корреляции близок к единице.

Доля подземного стока в годовом стоке по данным створа Ока/Горбатов за период гидрометрических наблюдений увеличилась в среднем с 0,4 до 0,7. Таким образом, за счет разгрузки ПВ в реки осуществляется практически две трети общего суммарного стока Оки в Волжский бассейн.

Увеличение подземного питания рек подтверждается данными наблюдений на воднобалансовых станциях (ВБС), в том числе и на Подмосковной ВБС, расположенной в Окском бассейне. По данным ГГИ (Водные ресурсы..., 2008) на большинстве ВБС фиксируется увеличение сумм осадков как за зимний, так и за летне-осенний период, а рост уровня грунтовых вод в среднем составляет 50–130 см. При этом увеличение увлажненности происходит на фоне существенного потепления зимнего и весеннего сезонов, что приводит к снижению промерзания почвы и увеличению влажности метрового слоя и соответствующему повышению абсолютной и удельной величин питания ПВ и их естественных ресурсов.

Переоценка ресурсов ПВ и степени их изменения на современном этапе должна производиться с учетом периодичности гидрологических и гидрогеологических процессов формирования стока. В этом случае возникает важная за-

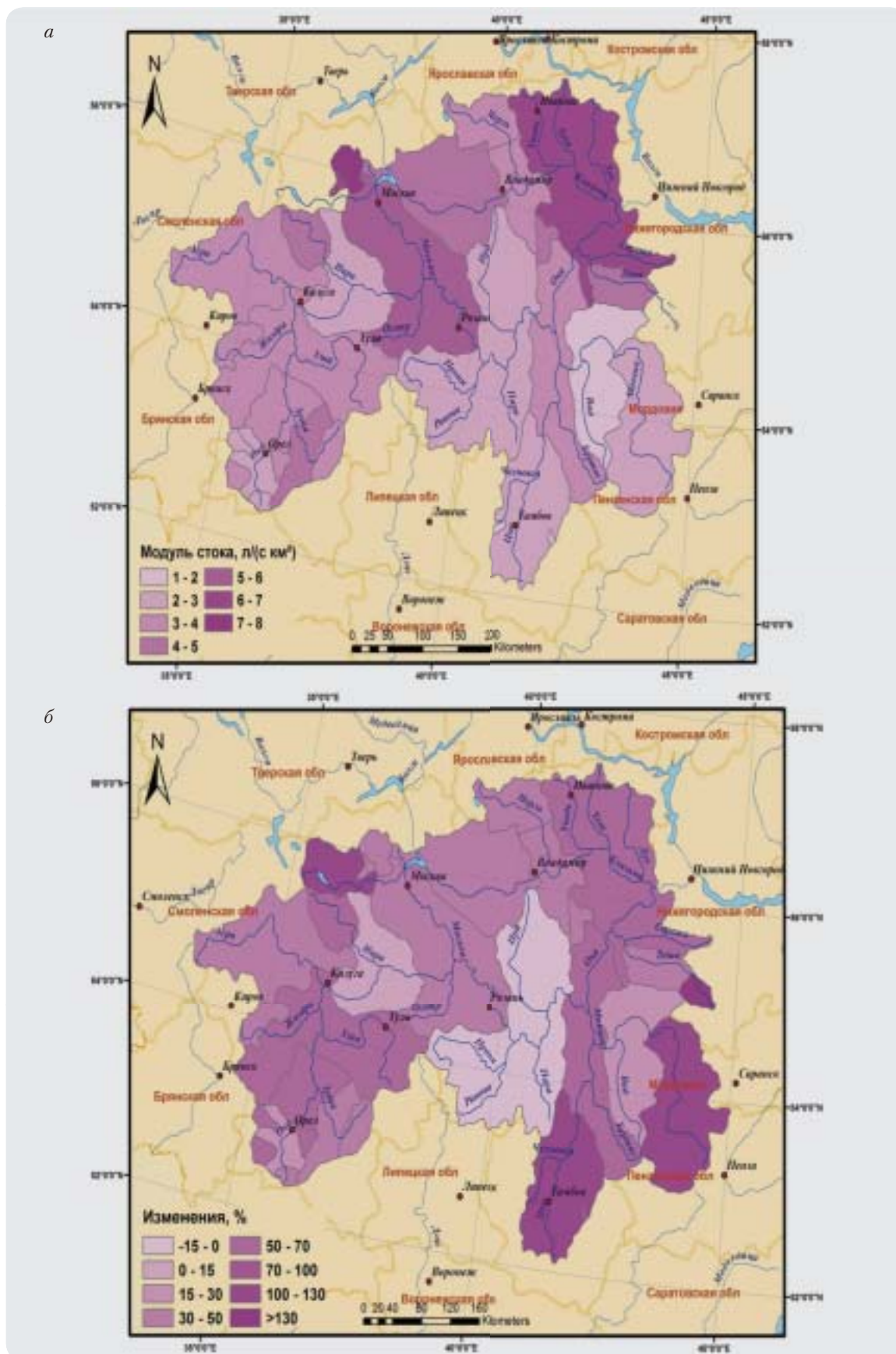


Рис. 1.
Современные естественные ресурсы подземных вод (а) бассейна Оки и их изменения (б) по сравнению с 1946–1977 гг.

дача выбора репрезентативного периода для оценки современного состояния водных ресурсов и предыдущего устойчивого состояния, необходимого для сравнительных оценок.

В гидрологических исследованиях эта проблема одна из ключевых с точки зрения получения расчетных характеристик стока, для чего разработан относительно простой и универсальный подход к выбору расчетного периода, основанный на построении *разностно-интегральных кривых* стоковых характеристик. Суть метода заключается в построении «накопительных кривых», как суммарное накопление отклонений от среднего значения.

На основе построенных кривых за репрезентативный период принят 1978–2010 гг., который охватывает полный цикл колебаний водности и отражает не только масштабы изменений ресурсов поверхностных и подземных вод за этот интервал, но и их современное состояние и особенности формирования. При этом за более ранний период, соответствующий предыдущему устойчивому состоянию, принято считать интервал 1946–1977 гг., который также имеет достаточную длину ряда и охватывает полный цикл колебаний стока.

Для выбранного периода (1978–2010) построены карты водных ресурсов бассейна Оки и их изменений по сравнению с показателями предыдущего периода (1946–1977), а также карта коэффициента вариации.

Изменения общих водных ресурсов в бассейне колеблются в пределах 20–30%, причем имеют как положительные, так и отрицательные значения. Более интенсивный рост водных ресурсов наблюдается на участке от Каширы до Половского и на участке от Касимова до Горбатова (от 20 до 50%). Однако на участке от Половского до Касимова происходит снижение общих водных ресурсов до 15%.

Водные ресурсы в бассейне Оки и их изменение за 1932–2010 гг. (р. Ока – г. Горбатов)

Таблица 2

Период	Показатель	W, км ³ /год	W _{подз.} , км ³ /год	W _{мин. месячный} , км ³ /год		φ
				зима	лето-осень	
1946–1977	Среднее	36,5	20,2	14,5	16,6	0,62
	C _v	0,22	0,21	0,24	0,23	0,12
1978–2010	Среднее	43,1	29,4	24,3	23,8	0,74
	C _v	0,18	0,15	0,21	0,18	0,09
Изменение, %		18	46	67	43	18
F – критерий Фишера		0,97	1,10	2,20	1,29	0,70
t – критерий Стьюдента		-3,54	-9,02	-9,30	-7,46	-6,79

Изменчивость общих водных ресурсов для бассейна в среднем составляет 0,2 – 0,3. Наиболее высокие коэффициенты вариации (0,3–0,4) свойственны юго-восточной части бассейна – правобережным притокам нижнего течения Оки (бассейн Цны, Мокши, Теши, Вада).

Коэффициент естественной зарегулированности стока, связанный с долей подземного питания в общем речном стоке, начинает увеличиваться практически на 10 лет раньше, чем показатели ресурсов ПВ. Такое «отставание» характеристик ресурсов ПВ связано с их инерционностью, более поздней реакцией на происходящие климатические изменения.

Рост ресурсов ПВ наблюдается по всем постам в бассейне и статистически достоверен для всех створов. Увеличение ресурсов ПВ фиксируется как для малых, так и больших рек бассейна Оки.

Колебания ресурсов ПВ рек, различающихся в разы по площади водосбора, носят синхронный характер, что говорит о том, что даже на малых реках, сток которых часто отражает исключительно индивидуальные условия каждого водосбора, сказалось общее увеличение увлажненности, приводящее к увеличению ресурсов ПВ.

Наиболее интенсивный рост естественных ресурсов ПВ наблюдается на правобережье нижнего течения Оки, в бассейнах рек Мокша и Цна, где произошло увеличение ресурсов в 2 раза и более (112 и 110%) (*табл. 1*).

Распределение ресурсов ПВ в Окском бассейне носит неравномерный характер (*рис. 1а*). Наиболее высокие значения водных ресурсов свойственны бассейну Москвы, низовьям Оки (от Касимова до Горбатова) и нижнему течению Клязьмы. Здесь модуль подземного стока составляет от 6 до 8 л/(с·км²). В верхнем течении Оки (бассейн Угры, Уши, Жиздры) модуль ресурсов ПВ (подземного стока) равен 3–4 л/(с·км²), повышаясь в бассейне Нары до 4–5 л/(с·км²).

Наименьшими ресурсами ПВ обладает юго-восточная часть бассейна, где модули снижа-

ются до 2–3 л/(с·км²), а в бассейне Вада и на участке Мокши от Темникова до Шевеленского Майдана – до 1–2 л/(с·км²). Интересно отметить, что на участке с минимальными модулями подземного стока наблюдается их наибольшее увеличение, до 100% (*рис. 1б*).

Для остальных рек прирост ресурсов ПВ составляет около 50–70%, снижаясь на участках течения Оки от Калуги до Каширы и от Половского до Касимова до 15–20%.

Подземный сток обладает пониженной межгодовой изменчивостью, что связано с инерционностью процессов его формирования, бассейновым регулированием, замедленным водообменом в грунтовых горизонтах. В целом для бассейна Оки коэффициент вариации подземного стока составляет 0,2. Относительно повышенной межгодовой изменчивостью обладают реки верхнего течения Клязьмы (Нерль), Мокша и Цна. Здесь значение коэффициента вариации подземного стока достигает 0,3 – 0,4.

Инерционность процессов формирования подземного стока определяет связность смежных значений ресурсов ПВ, которая прослеживается в течение очень длительного периода. Даже при сдвиге значений стока на 9 и более лет наблюдаются высокие коэффициенты автокорреляции.

Исключительно важным представляется значение ресурсов ПВ в наиболее критический, лимитирующий месяц. Для 80% рек наименьшие месячные значения стока наблюдаются в летний период. Однако более целесообразно рассматривать эти два периода в отдельности. Наиболее высокие значения модуля подземного стока 5–7 л/(с·км²) наблюдаются в среднем и нижнем течении Оки, а также на притоках северной части водосбора. Область наименьших значений локализуется в юго-восточной части водосбора, где в критические месяцы модуль подземного стока снижается до 2 л/(с·км²) и менее.

Современный рост подземного питания и ресурсов ПВ происходит во время как летней, так и зимней межени. Область наибольших изменений этих характеристик, так же как и для ресурсов ПВ в целом, локализуется в юго-восточной части бассейна, где прирост минимальных месячных модулей стока достигает 100%.

Изменчивость минимальных месячных значений ресурсов ПВ имеет пространственное распределение аналогичное ресурсам ПВ в целом. Коэффициент вариации минимальных месячных значений варьирует в среднем от 0,2 до 0,3, увеличиваясь в юго-восточной части до 0,3–0,4.


Синхронность изменения зимних и летне-осенних ресурсов ПВ, может быть также показана с помощью графиков связи этих двух величин. Зависимости такого рода представляют собой линейные уравнения, с коэффициентами корреляции от 0,5 до 0,8.

Следует подчеркнуть все возрастающую роль подземной составляющей в суммарном стоке рек. В настоящее время за счет подземного стока осуществляется 2/3 стока со всего бассейна Оки, похожая картина наблюдается и для стока ее притоков. В некоторых случаях, например для Цны и Мокши доля подземной составляющей стока увеличилась почти в 2 раза.

Доля подземного стока в суммарном стоке бассейна Оки меняется от 0,3 до 0,7, составляя в среднем около 0,5–0,6. Изменение этого соотношения наилучшим образом иллюстрирует все возрастающую роль естественных ресурсов подземного стока в суммарных водных ресурсах региона (*табл. 2*).

Соотношение подземной и поверхностной составляющей стока, традиционно считавшееся < 1 для рек ЕЧР, возрастает практически в 3 раза за период инструментальных наблюдений. Следует подчеркнуть, что в настоящий момент поверхностный сток играет второстепенную роль в формировании суммарного стока рек, его доля часто не превышает 30–40%.

Вывод

Согласно выполненным расчетам современные суммарные водные ресурсы в бассейне Оки составляют 43,1 км³/год, причем за 1976–2010 гг. они возросли в среднем на 18%. При этом 29,4 км³/год (около 70%) составляют ресурсы ПВ. Проведенный статистический анализ выявил существование неоднородности в многолетних колебаниях стока по всем исследуемым характеристикам (критерий Стьюдента), а также снижение изменчивости минимального месячного зимнего и летнего стока. 

Литература

1. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб. 2008.
2. Семенов В.А., Семенова И.В. Антропогенно-климатические изменения гидрологического и гидрохимического режима рек бассейна Верхней Оки // Метеорология и гидрология. 2003. № 10. С 83–92.