



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



Н.Л. Фролова
МГУ им. М.В. Ломоносова
географический факультет
доцент кафедры гидрологии
frolova_nl@mail.ru



Т.И. Сафронова
Институт водных проблем РАН
ведущий инженер
tisafr@yandex.ru



М.И. Иголина
Институт водных
проблем РАН
инженер
mashka_bk.ru

Современные водные ресурсы Европейской территории России¹

Авторы статьи анализируют изменения характеристик годового, межennaleго и минимального месячного стока рек Европейской территории России за последние 35 лет в сопоставлении с аналогичным по продолжительности периодом 1935–1969 гг. Установлены региональные закономерности гидрологических процессов, проведена переоценка естественных ресурсов поверхностных и подземных вод за период 1970–2005 гг., построены соответствующие карты

The authors of the article analyze the changing of characteristics of annual, low-water and minimal monthly river flow in the European part of Russia over the past 35 years, in comparison with the same duration period 1935–1969. Regional regularities in hydrological processes are established, The natural resources of surface and subsurface waters for period 1970–2005 are reevaluated, and appropriate maps are constructed

Ключевые слова: естественные ресурсы подземных вод, ресурсы поверхностных вод, подземный сток, подземный сток, речной сток, режим стока

Keywords: natural groundwater resources, surface water resources, groundwater flow, river runoff; flow regime

В настоящее время назрела необходимость переоценки возобновляемых водных ресурсов (естественных ресурсов подземных и поверхностных вод), так как предыдущие подобные региональные исследования проводились в 1970–1980 гг. В основе анализа пространственно-временной изменчивости водных ресурсов лежат исследования условий формирования ресурсов поверхностных и подземных вод в пределах речного водосбора. Изучение современных особенностей формирования подземной и поверхностной составляющих речного стока позволяет судить о распределении общих водных ресурсов на Европейской территории России (ЕТР) и их динамике под влиянием нестационарного климата.

Исходными данными для оценки и анализа послужили материалы примерно по 300 водосборам ЕТР, выбранным в качестве репрезентативных для пространственно-временного анализа изменения условий формирования и динамики водных ресурсов на этой территории РФ с 1935 г. по 2005 г. Для каждого поста расчеты проводились для трех периодов: за весь период наблюдений, за 1940–1969 гг. и 1970–2005 гг. Выбор 1970 г. в качестве порогового обусловлен изменением климатических условий на большей части ЕТР именно в эти годы. Кроме того, периоды в 30 и более лет соответствуют таким временным интервалам, когда выявляемые изменения в гидрометеорологических рядах могут рассматриваться как репрезентативные [1, 2, 3, 8].

Исследования охватывают не только многолетние, но и внутригодовые колебания гидрологических характеристик. Наименьший масштаб осреднения по времени – месяц, максимальный – 129 лет, с 1881 г. по 2009 г. (Сев. Двина, створ Усть-Пинега). В качестве характеристики подземной составляющей речного

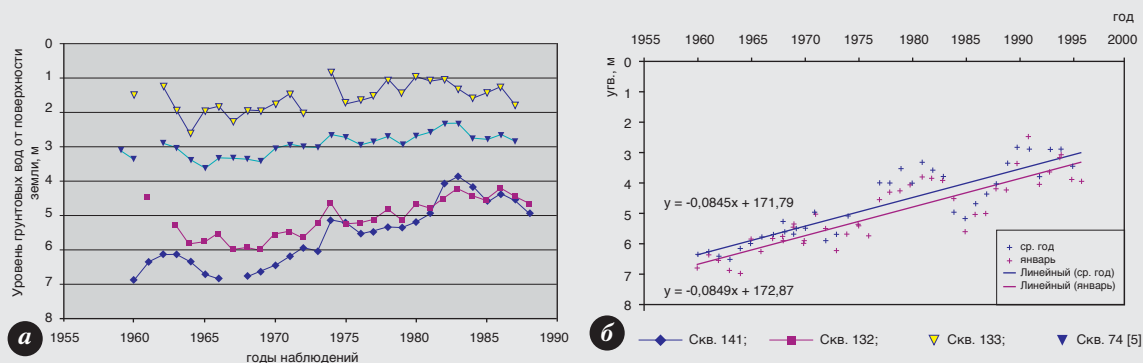
стока принят меженный сток, рассчитываемый как среднемесячный расход воды в маловодные месяцы, когда река питается преимущественно подземными водами.

Факторы и характер изменения режима стока рек

Повышение среднегодовой температуры происходит на территории всей России, за 1976–2010 гг. оно составило около 1,5 °С. Наиболее интенсивное и статистически значимое повышение среднегодовой температуры приземного воздуха произошло на ЕТР (0,56 °С/10 лет), причем увеличение средних температур за холодный период несколько выше (0,62 °С/10 лет). Средние температуры воздуха за теплый период также имеют тенденцию к увеличению (0,57 °С/10 лет), однако это увеличение во многих случаях статистически незначимо. На фоне прогрессирующего потепления на большей части ЕТР отмечается фаза повышенной водности и общей увлажненности. За период 1976–2010 гг. установлено некоторое увеличение сумм осадков, особенно в холодное полугодие (0,78 мм/мес./10 лет). Зимние осадки связаны исключительно с атлантическим влагопереносом, за счет которого образуется до 70% осадков холодного периода на большей части ЕТР. Такое распределение осадков объясняется особенностями циркуляции, обуславливающими убывание количества осадков в обе стороны от средних широт, особенно заметное в теплый период и не столь существенное – в холодный [4].

В связи с повышением температуры и некоторым увеличением осадков холодного периода участились зимние оттепели, уменьшилась глубина сезонного промерзания пород зоны аэрации. Значительная часть сформировавшегося талого стока стала участвовать в увеличении влажности пород зоны аэрации

Рис. 1.
Динамика среднегодовых уровней грунтовых вод на водосборе р. Медвенки (а) и в Каменной степи (скв. 1) (б)



Сопоставление среднемесячных уровней (м) грунтовых вод в ноябре–апреле 1962–1963 и 1974–1975 гг. [5]

Таблица 1

Месяц	1962–1963 гг. скважина 133	1974–1975 гг. скважина 133	1962–1963 гг. скважина 74	1974–1975 гг. скважина 74
XI	0,41	0,57	2,80	2,79
XII	0,69	0,58	2,79	2,77
I	1,63	0,89	2,87	2,70
II	2,03	1,17	2,92	2,59
III	2,30	0,57	2,97	2,56
IV	1,62	0,57	2,95	2,53

и питания подземных вод, что привело к значительному росту межлетнего (подземного) стока рек. Изменчивость климатических факторов особенно быстро проявляется на небольших водосборах. В статье [3] приведен анализ практически синхронной реакции среднемесячного стока р. Медвенки (Московская обл.) на рост температуры приземного воздуха в течение 1958–1980 и 1981–2008 гг. Особенно это проявилось в январе–феврале, когда сток вырос почти на 90% по сравнению с периодом 1958–1980 гг. Столь существенное увеличение зимнего стока связано, прежде всего, с возросшим общим числом суток с положительной температурой в январе–феврале 1981–2008 гг. с 77 до 263 по сравнению с 1958–1980 гг.

Следовательно, в современных климатических условиях к ведущим факторам регионального увеличения зимнего межлетнего стока малых и средних рек ЕТР следует отнести, прежде всего, повышенное осеннее увлажнение водосбора, частые зимние оттепели и неглубокое промерзания зоны аэрации. При повышении температуры воздуха в зимний период возрастают потери талого стока на инфильтрацию по сравнению с предыдущими десятилетиями, что проявляется в изменении не только стоковых характеристик, но и в повышении уровня грунтовых вод (УГВ). В *таблице 1* приведены данные наблюдений по скважинам на водосборе р. Медвенки с высоким (скв. 133) и низким (скв. 74) залеганием УГВ за годы с различными условиями промерзания (средняя температура за январь–февраль в 1963 г. составила минус 14 °С, а в 1975 г. – минус 5,5 °С). Динамика УГВ за многолетний период в Каменной степи также свидетельствует о его росте в последние годы (*рис. 1*).

Сокращение глубины промерзания зоны аэрации сопровождается активным формированием ячеистой структуры в распределении мощности мерзлой зоны с преобладанием слабomerзлых площадей (до 50–60%), что приводит к увеличению потерь талого стока

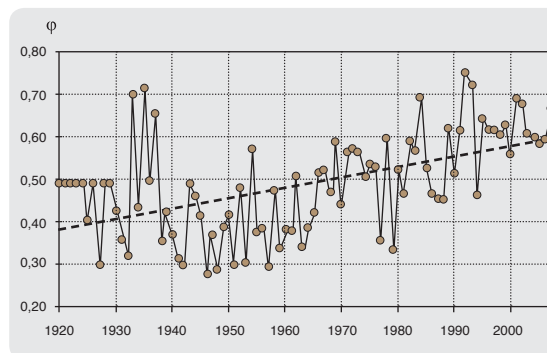


Рис. 2.
Изменение коэффициента естественной зарегулированности стока р. Хопер (г. Балашов)

на инфильтрацию и питание подземных вод. В связи с этим снижаются весенний склоновый сток и пики половодья в речной сети. Коэффициент талого стока уменьшается до 0,3–0,4, и гидрограф половодья становится более пологим.

Колебания уровня болотных вод влияют не только на сезонный режим и величины стока, но и на интенсивность эмиссии парниковых газов и, прежде всего, метана. Метаногенез определяется в данном случае анаэробными восстановительными условиями ниже уровня болотных вод. Чем выше их уровень, тем активнее деятельность метаногенных бактерий и интенсивнее поток CH_4 , обогревающий эффект которого в 4 раза выше, чем у CO_2 . Экспериментально установлено, что для северо-западных регионов ЕТР при положении болотных вод ниже 35 см эмиссия метана из заболоченных массивов сокращается [6].

Перестройка водного режима рек связана со значительным сокращением стока за половодье, увеличением числа, продолжительности и «глубины» оттепелей в холодный период и общим сокращением его длительности. Все это приводит к росту естественной зарегулированности стока, которая характеризуется коэффициентом φ (отношение базисного стока к годовому) и позволяет оценить перераспределение стока внутри года. Статистически значимый возрастающий тренд этой характеристики установлен для большинства

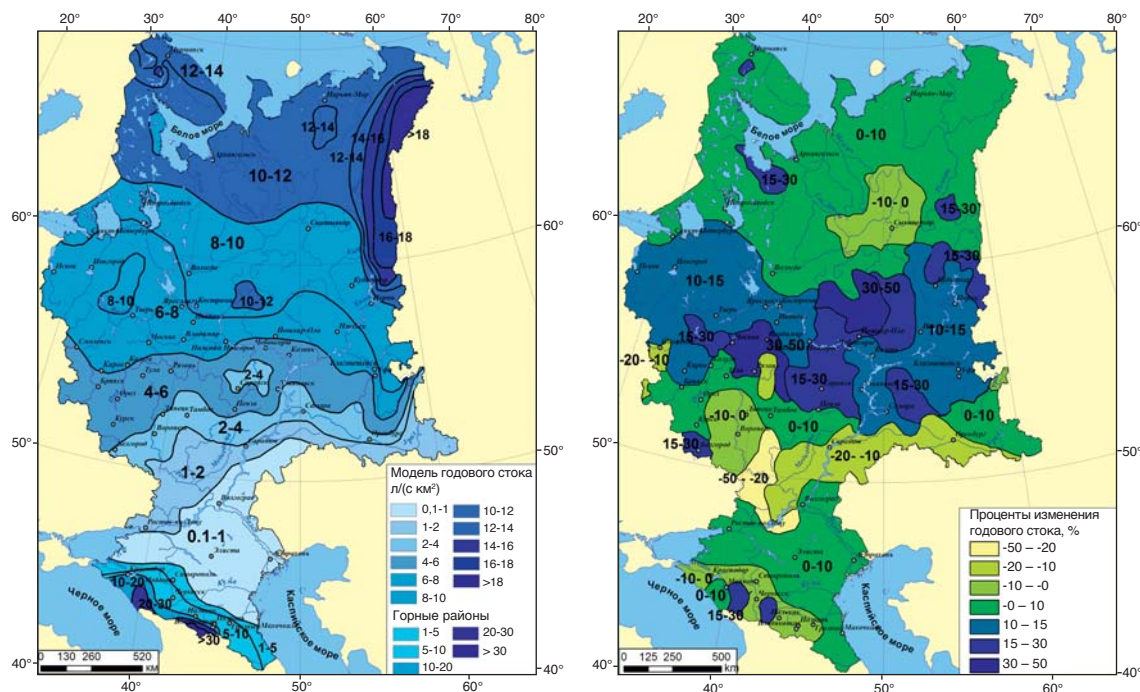


Рис. 3.
Среднегодовой сток рек ЕТР в 1970–2005 гг. (л/с км²) и его изменения по сравнению с периодом 1940–1969 гг. (%)

рассматриваемых рек ЕТР. Особенно значительное увеличение зарегулированности стока отмечено для рек бассейна Оки, Суры, Б. Кинели и некоторых других. Так, для рек Мокша, Ока, Хопер ф увеличился с 0,4 (1935–1969 гг.) до 0,6–0,7 (1970–2005 гг.) (рис. 2).

Динамика водных ресурсов России за 1978–2007 гг. и их отклонение от среднего значения свидетельствуют, что только в течение пяти отдельных лет водные ресурсы РФ были меньше, чем в среднем за предшествующий период (1936–1977 гг.) [7, 9]. Климатические изменения последних десятилетий отразились на величинах годового, сезонного и минимального стока рек (рис. 3).

Во внутригодовом распределении стока заметно последовательное снижение максимальных расходов и расплывание волны половодья, постепенное увеличение меженного стока, особенно в 2000-е гг. Одновершинные гидрографы с четким весенним максимумом, характерные для режима восточноевропейских рек в 1970-е гг., приобретают современную гребенчатую форму в фазу повышенной водности, характерную для западноевропейских рек. Превышение весенних максимальных расходов воды над средними меженными сокращается с 10–15 раз до 3–5 раз (рис. 4).

Изменения меженного (подземного) стока отмечаются для большинства рек ЕТР. Положительные значимые тренды (при уровне значимости 95%) увеличения стока зимней и летне-осенней межени характерны для южной части лесной и лесостепной зон (бассейны верхней и средней Волги, Оки), большей части бассейна Урала. Наибольшие изменения

меженного стока (70% и более) характерны для верховьев Оки и Урала. Для рек бассейна Волги (за исключением Камы) увеличение зимнего меженного стока составляет 45–70%. Примерно такая же величина характерна для изменения меженного стока верховьев Дона. Вместе с тем на севере ЕТР, а также южнее Цимлянского водохранилища отмечается либо незначительное уменьшение среднего меженного стока, либо столь же статистически незначимое увеличение.

В начале XXI в. модули меженного (подземного) стока и, соответственно, естественные ресурсы подземных вод выросли в среднем на 40–60% по сравнению с величинами, зарегистрированными до 70-х гг. XX в., или примерно в 1,5 раза. Максимальное изменение меженного стока характерно для лесостепной зоны, что связано не столько с увеличением снегозапасов, сколько с особенностями снижения весеннего стока и перевода его в подземный (рис. 5).

Рост меженного стока связан, прежде всего, с увеличением температуры воздуха

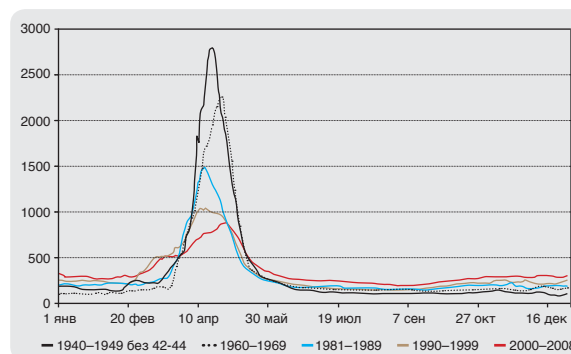
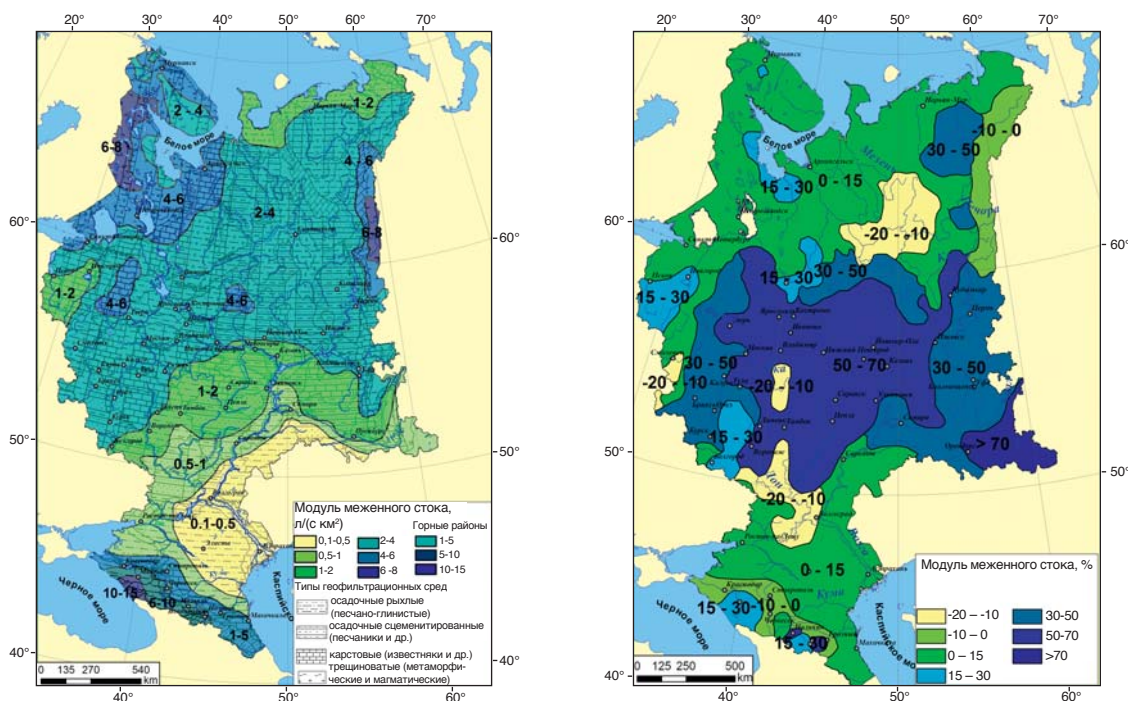


Рис. 4.
Средние по десятилетиям гидрографы р. Дон (ст. Казанская)

Рис. 5.
Средний
меженный
сток рек ЕТР
в 1970–2005 гг.
(л/с км²) и его
изменения по
сравнению
с периодом
1940–1969 гг.
(%)



в холодный период года, а это, как уже отмечалось, ведет к увеличению числа и продолжительности оттепелей и сокращению длительности зимнего сезона. При этом наблюдается уменьшение сумм отрицательных температур воздуха, что особенно важно для изменений условий питания подземных вод. В результате уменьшается глубина промерзания грунтов в зимний сезон, особенно перед началом снеготаяния. Эти процессы приводят не только к увеличению инфильтрации талого стока, но и к сокращению склонового стока и повышению суммарной величины подземного стока.

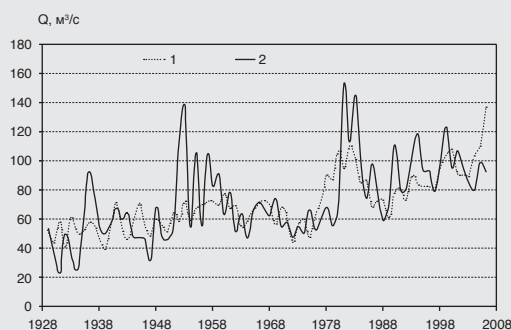
Увеличение меженного стока за маловодный период на реках южного склона ЕТР происходит как за счет роста зимних расходов воды, так и за счет роста летних минимальных расходов, обусловленных увеличением суммы атмосферных осадков (рис. 6).

Чем продолжительнее межень, тем в большей степени проявляется «чистота» подземного питания в период минимальных расходов. При короткой прерывистой межени в формировании минимального стока участвуют

поверхностные воды, а при частых паводках выделение минимального расхода становится затруднительным и нередко условным.

Модуль минимального месячного подземного стока изменяется по ЕТР не столь резко и в среднем составляет 1–2 л/с км². Максимальные модули месячного стока (до 2–3 л/с км²) характерны для севера ЕТР. В низовьях Дона и Волги значения минимального модуля стока уменьшаются и варьируют в пределах от 0 до 1 л/с км² (рис. 7). В изменениях минимального стока (как и других генетических составляющих водных ресурсов) прослеживается широтная зональность с севера на юг: на северных реках ЕТР изменения минимального стока от 15–25% в их низовьях до 30–50% в среднем течении Сев. Двины и Печоры. Наиболее существенное увеличение минимального стока (50–70% и выше) происходит в верхнем течении Оки, среднем течении Волги, в бассейне Урала. К югу от этой полосы (устье и среднее течение Дона, Предкавказье) рост минимального стока менее значителен (до 15%) вплоть до его снижения. В верхнем течении Дона и на его основных притоках минимальный сток снова возрастает до 50–70% и более (рис. 7).

Рис. 6.
Изменения
среднего ме-
женного летне-
го – 1 (VII–IX)
и зимнего –
2 (XII–II) сто-
ка р. Дон
(г. Задонск)



Выводы

Анализ многолетних колебаний естественных ресурсов, годового, сезонного и среднемесячного стока рек ЕТР позволяет сделать следующие выводы:

- положительный тренд средних годовых и особенно зимних температур воздуха, а также атмосферных осадков оказали значительное влияние на водность рек и их водный режим;

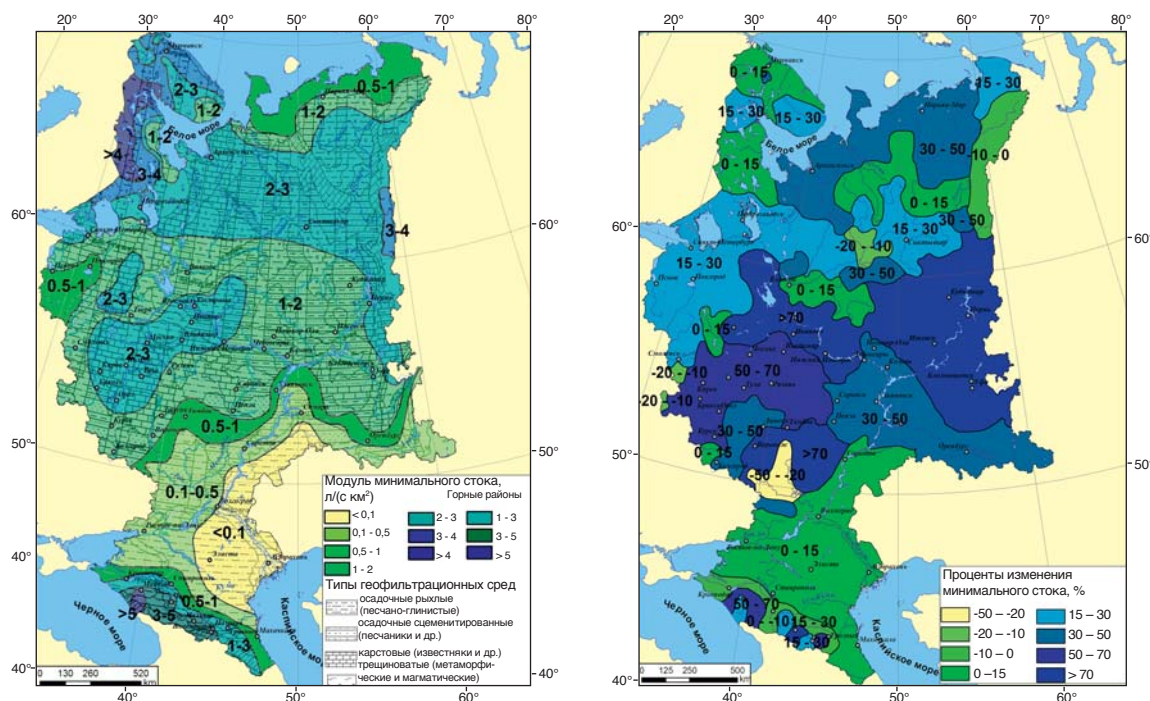


Рис. 7.
Средний минимальный месячный сток рек ЕТР в 1970–2005 гг. (л/с км²) и его изменения по сравнению с периодом 1940–1969 гг. (%)

- основная особенность современных изменений режима рек ЕТР – перераспределение стока внутри года при относительном постоянстве среднегодовых расходов воды, а также сокращение доли половодья в среднегодовом стоке воды. Коренным образом меняются форма и общий вид гидрографа стока;
- для большинства рек ЕТР произошли изменения в режиме стока и источниках питания рек. С конца XX в. многие реки имеют смешанное питание с преобладанием подземного. Это привело к значительному увеличению естественной зарегулированности стока, по своему масштабу сопоставимому с влиянием «водохранилищ сезонного регулирования»;
- основная особенность современного водного режима рек – существенное изменение внутригодового режима с увеличением меженного стока, особенно зимнего. В пределах крупных регионов отмечаются значимые (при уровне значимости 95%) положительные тренды увеличения стока зимой и летне-осенней

межени. Рост меженного стока в последние 25–30 лет обусловил увеличение естественных ресурсов подземных вод даже в бассейнах рек, где произошло снижение стока весеннего половодья. Такая ситуация сложилась впервые, т.к. ранее основные маловодные и многоводные фазы определялись величиной стока весеннего половодья;

- на большей части территории России ожидается увеличение удельной водообеспеченности на 10–25%. Только 10 субъектов, расположенных в Центральном, Поволжском, Южном и Северокавказском федеральных округах, имеют низкую водообеспеченность. Суммарные ежегодно возобновляемые водные ресурсы речных бассейнов и водотоков ЕТР, оцененные по субъектам РФ [1], составляют 949 км³, в том числе объем вод местного формирования – 888 км³. На одного жителя ЕТР в среднем приходится 9200 м³/год общих ресурсов речного стока, из которых 8600 м³/год – воды местного формирования. ❊

Литература

1. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб., ГГИ. 2008. 598 с.
2. Джамалов Р.Г., Зекцер И.С. и др. Изменение подземного стока под влиянием климата и антропогенных воздействий // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 1. С. 17–24.
3. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л. и др. Влияние изменений климата на сток и водный режим рек ЕТР // В сб. Проблемы безопасности в водохозяйственном комплексе России. Краснодар, ООО «Авангард плюс». 2010. С. 106–116.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 год. Москва, 2011 // <http://www.meteorf.ru>.
5. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Основные физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек в условиях потепления климата // Гидрология и метеорология. 2012. № 1. С. 68–81.
6. Калюжный И.Л., Лавров С.А., Романюк К.Д. Изменения водного режима болот севера и северо-запада России под влиянием климатических факторов // Водные ресурсы. Том 39, № 1. 2012. С. 13–22.
7. Шикломанов И.А., Бабкин В.И., Балонишникова Ж.А. Водные ресурсы, их использование и водообеспеченность в России: современные и перспективные оценки // Водные ресурсы. 2011, Т. 38. № 2. С.131–141.
8. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B., Safronova T.I. Climate-Induced Changes in Groundwater Runoff in Don Basin // Water Resources. 2010. Vol. 37. No. 5. P.733–742.
9. World water resources at the beginning of the 21st century. Project of IHP UNESCO / Ed. Shiklomanov I.A. St. Petersburg. 1999. 395 p.