



К 100-летию со дня рождения Бориса Ивановича Куделина

# **РЕСУРСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

Материалы Международной научной конференции, Москва, 13-14 мая 2010 г.

УДК 556.3  
ББК 26.35  
P43

*Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
Проект РФФИ № 10-05-06025*

P43

**Ресурсы подземных вод: Современные проблемы изучения и использования: Материалы международной научной конференции. Москва, 13–14 мая 2010 г.: К 100-летию со дня рождения Бориса Ивановича Куделина.** – М.: МАКС Пресс, 2010. – 552 с.  
ISBN 978-5-317-03216-6

Сборник содержит доклады международной научной конференции «Ресурсы подземных вод. Современные проблемы изучения и использования», посвящённой 100-летию со дня рождения Бориса Ивановича Куделина, крупного учёного, профессора МГУ имени М.В. Ломоносова. В докладах рассматриваются современные методы картирования, изучения региональной изменчивости естественных ресурсов подземных вод, модели взаимосвязи поверхностных и подземных вод, формирования инфильтрационного питания для оценки естественных ресурсов, изменения климата и ресурсы подземных вод, эксплуатационные запасы и ресурсы подземных вод.

Обсуждение докладов проходило на пленарном заседании (13 мая 2010 г.) и по двум секциям (14 мая 2010 г.):

1. Подземный сток и ресурсы подземных вод;
2. Гидрогеохимические и гидрогеоэкологические исследования.

УДК 556.3  
ББК 26.35

ISBN 978-5-317-03216-6

© Коллектив авторов, 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	9
<i>Всеволожский В.А., Зекцер И.С.</i> Куделин Борис Иванович – учёный и педагог.....	10
<i>Зекцер И.С.</i> Современное состояние региональных исследований пресных подземных вод.....	16
<i>Боревский Б.В., Язвин А.Л.</i> Оценка ресурсного потенциала подземных вод. Современные проблемы изучения и использования.....	30
<i>Зверев В.П.</i> Массы и массопотоки подземных вод земной коры и ее эволюция.....	40
<i>Пашковский И.С.</i> Подземный сток в многопластовых системах.....	50
<i>Хаустов А.П.</i> Оценка естественных ресурсов подземных вод и проблемы анализа устойчивости гидрогеологических систем.....	55
<i>Шварцев С.Л.</i> О роли водообмена в направленной эволюции системы вода–порода.....	65
<i>Гылыбов М.</i> Подходы оценки и категоризации эксплуатационных ресурсов подземных вод в зависимости от способа эксплуатации.....	72
<i>Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Сафронова Т.И.</i> Изменения режима и величины подземного стока рек европейской территории России под влиянием нестационарного климата.....	83
<i>Марков М.Л.</i> Проблемы оценки естественных ресурсов подземных вод по гидрологическим данным в условиях изменения климата.....	94
<i>Всеволожский В.А., Кочеткова Р.П.</i> Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод при среднемасштабных исследованиях.....	98
<i>Сатпаев А.Г., Сыдыков Ж.С., Джакелов А.К.</i> Естественные ресурсы и эксплуатационные запасы слабоминерализованных подземных вод Казахстана.....	109



вующих климатических условиях, так и при прогнозируемых изменениях климата и основных его элементов.

В настоящей работе оценивается масштабы и степень изменений режима и величин годового и сезонного стока рек Европейской территории России (ЕТР) под влиянием современных вариаций климата. Большая протяженность рассматриваемой территории, различие форм атмосферной циркуляции, наличие гор и возвышенностей обуславливают разнообразие местных ландшафтов и климатов, что приводит к существенным различиям в формировании стока и других элементов водного баланса в природно-климатических зонах этой территории.

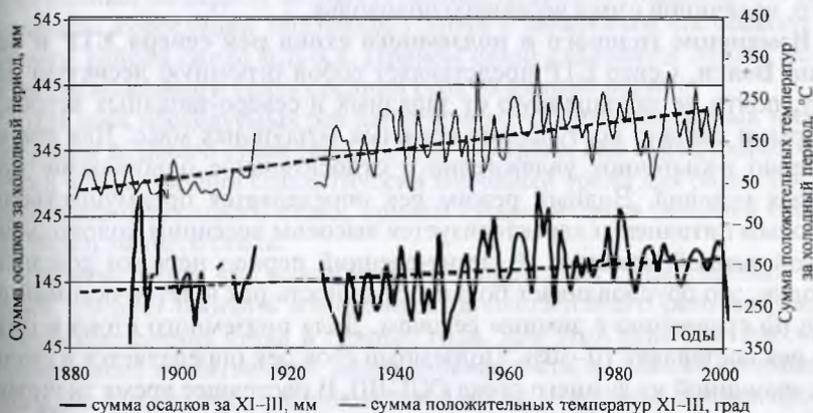
По степени водообеспеченности рассматриваемую территорию можно разделить, с некоторой долей условности, на три зоны: избыточного увлажнения (модуль общего речного стока более  $6 \text{ л/с}\cdot\text{км}^2$ ) – территория севернее примерно  $55^\circ$  с. ш. и Северный Кавказ, достаточного увлажнения ( $2\text{--}6 \text{ л/с}\cdot\text{км}^2$ ) – примерно между  $50$  и  $55^\circ$  с. ш. и недостаточного увлажнения (менее  $2 \text{ л/с}\cdot\text{км}^2$ ) – южнее  $50^\circ$  с. ш. [5]. Проведенные исследования охватывают реки, водосборы которых находятся в пределах всех трех зон – реки севера ЕТР (бассейны Северной Двины, Печоры, Мезени), Волги и Дона.

Величина подземного стока в реки определялась расчленением гидрографа речного стока известными в гидрологии методами. Один из них предложен Б.И. Куделиным (1960 г.) и нашел свое применение при подготовке под его руководством в 1960–1970 гг. карт подземного стока на территории СССР, 1:5 000 000 и 1: 2 500 000 масштабов [4].

**Общая характеристика изменения климатических и гидрологических условий на территории ЕТР.** Наиболее яркая особенность глобального и регионального климата – изменение температуры приземного воздуха в современную эпоху и дальнейшее потепление, прогнозируемое на ближайшие десятилетия. По данным специалистов Института глобального климата и экологии после 1975 г. существенное потепление отмечено на всей территории России. За 1976–2006 гг. в целом для России оно составило около  $1,4^\circ\text{C}$ . Наиболее интенсивное и статистически значимое повышение среднегодовой температуры приземного воздуха произошло на ЕТР ( $0,4\text{--}0,6^\circ\text{C}/10$  лет). При этом увеличение средних температур воздуха за холодный период отчетливо прослеживается для всей территории ЕТР, средние температуры воздуха за теплый период также имеют тенденцию к увеличению. Однако это увеличение во многих случаях статистически незначимо. В результате повышения температуры приземного воздуха холодного периода участились зимние оттепели, уменьшилась глубина сезонной промерзаемости пород зоны аэрации. Значительная часть сформировавшегося во время зимних оттепелей талого стока участвует в увеличении влажности деятельного слоя почвы и питания подземных вод.

За период 1976–2006 гг. также установлено увеличение годовых сумм осадков практически на всей территории России. Сопоставление осадков теплого и холодного полугодий показывает противоположные тенденции на ЕТР. Как правило, отмечаются отрицательные тренды в теплое полугодие или они вообще отсутствуют, а положительные – в холодное полугодие [6]. Увеличение количества осадков в холодное полугодие более достоверно.

В результате сложившейся климатической ситуации создались благоприятные условия для увеличения инфильтрационного питания подземных вод, что привело соответственно к возрастанию подземного питания рек и значительному росту их меженного стока. На рис. 1 приведен пример изменение суммы осадков и положительных суточных температур воздуха за холодный период (XI–III) на территории бассейна Дона за период 1881–2000 гг.



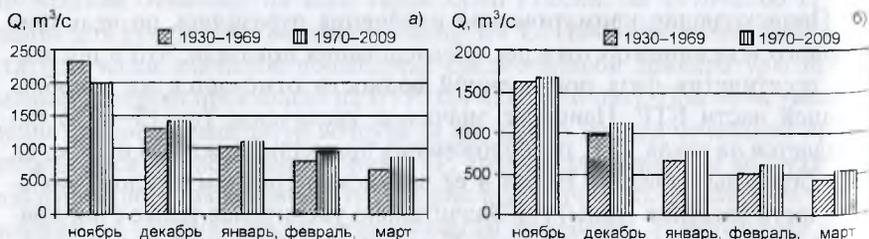
**Рис. 1.** Изменение суммы осадков и положительных суточных температур приземного воздуха за холодный период (XI–III) на территории бассейна Дона за период 1881–2000 гг.

Происходящие климатические изменения отразились на величине годового и сезонного стока рек. Исследования показали, что в последние десятилетия фаза повышенной водности отмечается на преобладающей части ЕТР. Наиболее значимое увеличение (на 15–40%) наблюдается на реках ЕТР, расположенных примерно между 56 и 60° с. ш. (левобережные притоки Волги в её верхнем и среднем течении, большая часть бассейна Камы) [1]. Значительно увеличился также сток притоков Волги в лесостепной зоне. К северу и югу от этой полосы прослеживается увеличение водности, но менее значительное. Годовой сток выше среднего на 10–15% в верхней части бассейна Северной Двины, в верховьях Днепра, на левобережных притоках Дона, на реках горной части бассейна Кубани. На остальной части ЕТР современные изменения стока были незначительны.

Основной особенностью современных изменений водного режима рек на преобладающей части территории страны является существенное увеличение меженного стока, особенно зимнего. В пределах регионов ЕТР для большинства рассмотренных рек отмечаются значимые (при уровне значимости 95%) положительные тренды увеличения стока зимней и летне-осенней межени.

Наблюдающаяся для обширных территорий «синхронизация» изменений меженного стока и масштабы этих изменений являются неординарными и не имеют аналогов в XX столетии. Рост меженного стока обусловил в последние 25–30 лет увеличение водных ресурсов даже в бассейнах рек, где произошло снижение стока весеннего половодья. Анализ данных наблюдений за последние сто лет позволил прийти к выводу о том, что такая ситуация сложилась впервые, так как ранее все значительные маловодные и многоводные фазы определялись, прежде всего, величиной стока весеннего половодья.

**Изменение годового и подземного стока рек севера ЕТР и бассейна Волги.** Север ЕТР представляет собой огромную лесистую равнину, почти не защищенную от западных и северо-западных ветров, с которыми связано поступление влажных воздушных масс. Для нее характерно избыточное увлажнение и относительное однообразие природных условий. Водный режим рек определяется преимущественно снеговым питанием и характеризуется высоким весенним половодьем и низкой зимней меженью. В летне-осенний период нередки дождевые паводки, это обуславливает большую водность рек в летне-осенний период по сравнению с зимним сезоном. Доля подземного стока в питании рек составляет 10–30%. Подземный сток рек определяется в основном величиной их зимнего стока (XII–III). В настоящее время значимый рост зимних расходов отмечается примерно для половины из 23 рассмотренных рек. При этом диапазон этих изменений колеблется от 5% для устьевой части Северной Двины и Печоры (рис. 2) до 25% для р. Юг. Величина годового стока меняется незначительно.



**Рис. 2.** Изменение месячных расходов воды ( $Q$ ,  $m^3/c$ ) за XI–III для р. Северной Двины (с. Усть-Пинега) (а) и р. Печоры (Усть-Цильма) (б)

Бассейн Волги расположен в нескольких природных зонах: в зоне тайги находится его северная часть; смешанные и широколиственные леса распространены на северо-западе; средняя часть бассейна Волги за-

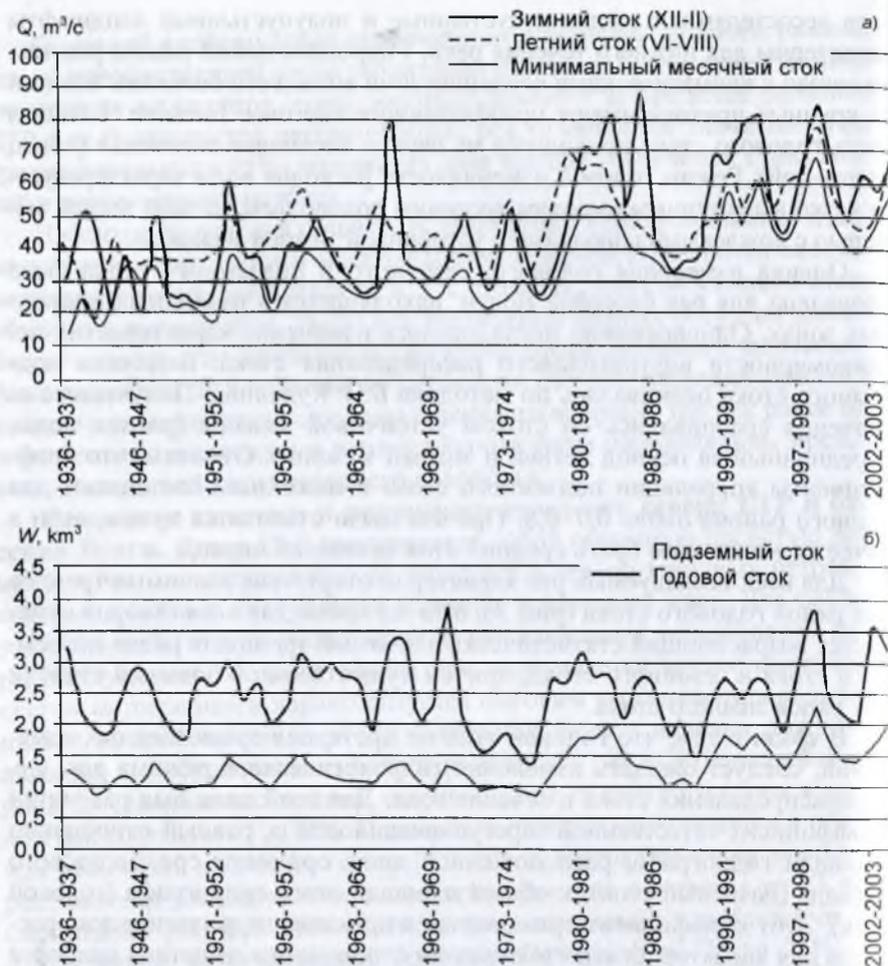
нята лесостепями и степями; пустынные и полупустынные ландшафты характерны для нижнего течения реки. Гидрологический режим рек тесно связан с климатическими особенностями волжского бассейна. Волга и ее крупные притоки имеют преобладающее снеговое питание. Большая часть годового стока приходится на период весеннего половодья (конец марта—май). Режим годовой изменчивости расходов воды характеризуется четко выраженным высоким весенним половодьем, низкой летней меженью с дождевыми паводками и устойчивой зимней меженью.

Оценка изменения годового, сезонного и подземного стока была проведена для рек бассейна Волги, находящихся в различных природных зонах. Одновременно исследовалось изменение характеристик неравномерности внутригодового распределения стока. Величина подземного стока оценивалась по методике Б.И. Куделина. Полученные ее значения сравнивались со стоком устойчивой межени (расход воды, осредненный за период летней и зимней межени). Отметим, что коэффициенты корреляции подземного стока с межennым составляют для данного района около 0,7–0,8. Причем связи становятся лучше, если в качестве межennого брать средний сток за зимний период.

Для всех исследуемых рек характерно отсутствие значимых трендов для рядов годового стока (рис. 3), в то же время для всех створов отмечается возрастающий статистически значимый тренд для рядов подземного стока и сезонного стока, причем существенно в большей степени для рядов зимнего стока.

В связи с тем, что годовой сток не претерпел существенных изменений, следует ожидать изменения гидрологического режима рек, т.е. перераспределения стока в течение года. Для этой цели был рассчитан коэффициент естественной зарегулированности  $\phi$ , равный отношению площади гидрографа, расположенной ниже ординаты среднегодового расхода (базисный сток), к общей площади этого гидрографа (годовой сток). Этот коэффициент применяется в практике гидрологических расчетов для характеристики стока рек по отношению к величине наиболее устойчивых («базисных») водных ресурсов. На рис. 4 отчетливо прослеживается увеличение доли базисного стока для бассейна Оки. Она возросла с 0,49 до 0,73, т.е. почти на 33%. Одновременно с изменением величины  $\phi$  происходит трансформация гидрографа р. Оки за счет уменьшения максимальных расходов весеннего половодья, уменьшения доли стока за половодье и увеличения расходов воды за летне-осенний и зимний период.

Происходящие изменения водного режима объясняются изменением сумм осадков за холодный и теплый периоды и их соотношением. Поскольку за период наблюдений максимальные расходы половодья имеют тенденцию к снижению (как и доля половодья в годовом стоке), представляется возможным сделать вывод о том, что происходит снижение внутригодовой неравномерности стока и увеличение естественной зарегулированности р. Оки.

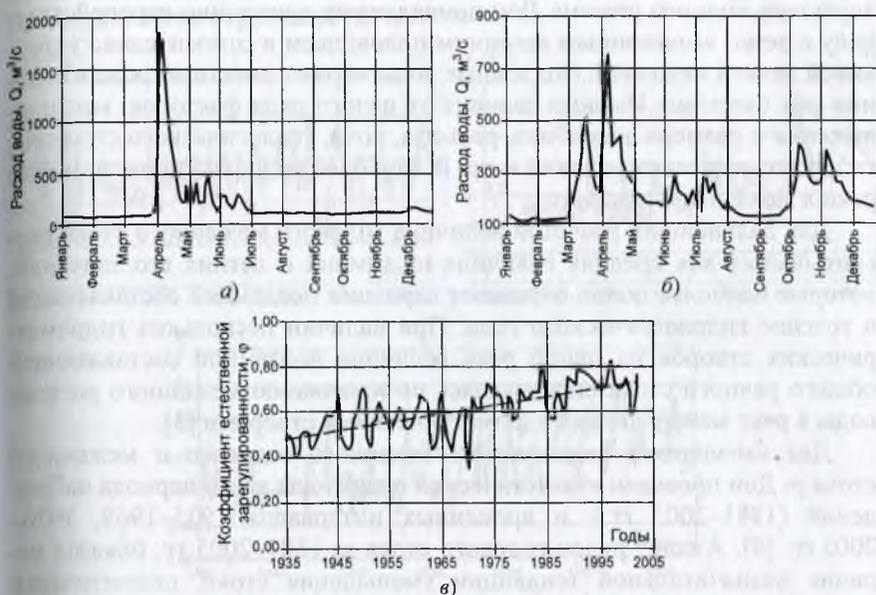


**Рис. 3.** Изменение среднего стока р. Оки (г. Белев) за зимний период (XII-II), летний период (VI-VIII), минимального месячного стока ( $Q$ ,  $\text{m}^3/\text{c}$ ) (а), объема суммарного годового и подземного стока ( $W$ ,  $\text{km}^3$ ) (б)

Следует подчеркнуть, что для рек юго-западного региона ЕТР и примыкающей к нему части бассейна Волги в 1978–2005-х гг. произошли изменения в генезисе их питания, обусловленные уменьшением весеннего стока и увеличением меженного.

Если до второй половины 1970-х годов, в соответствии с классификацией М.И. Львовича, реки указанных выше районов по источникам питания и внутригодовому распределению стока относились к категории рек «преимущественно снегового» питания, то в конце XX века произошел переход к категории рек со «смешанным питанием» или даже «смешанным с преобладанием грунтового». Это привело к значительному

увеличению естественной зарегулированное стока, по своему масштабу сопоставимому с влиянием водохранилищ сезонного регулирования.



**Рис. 4.** Гидрографы р. Оки (створ г. Калуга) за 1976 (а) и 1997 гг. (б) и изменение коэффициента естественной зарегулированности  $\phi$  (в) для поста р. Ока – г. Калуга за период 1935–2005 гг.

Расчеты показывают [3], что в целом для бассейна Волги подземный сток практически по всему водосбору Волги (створ Волгограда) возрос примерно на 15%, а в верховьях (створ Ивановко) – на 20–25%, по створу Горького – до 30% (табл. 1).

Таблица 1

**Расчетные значения подземного стока в бассейне Волги на рубеже XX–XXI веков [3]**

Река, створ	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Средневзвешенный модуль подземного стока, л/с·км <sup>2</sup>	Подземный сток по карте СССР, 1974 г., км <sup>3</sup> /год	Прирост средневзвешенного модуля подземного стока к 2000, л/с·км <sup>2</sup>	Подземный сток на рубеже XX–XXI веков, км <sup>3</sup> /год
Волга, Волгоград	1350	2,0	85	0,3	99,5
Волга, Горький	479	2,0	30,2	0,6	39,2
Волга, Ивановко	41	2,0	2,6	0,5	3,2
Кама, Тюлькино	81,8	2,5	6,4	0,5	7,7

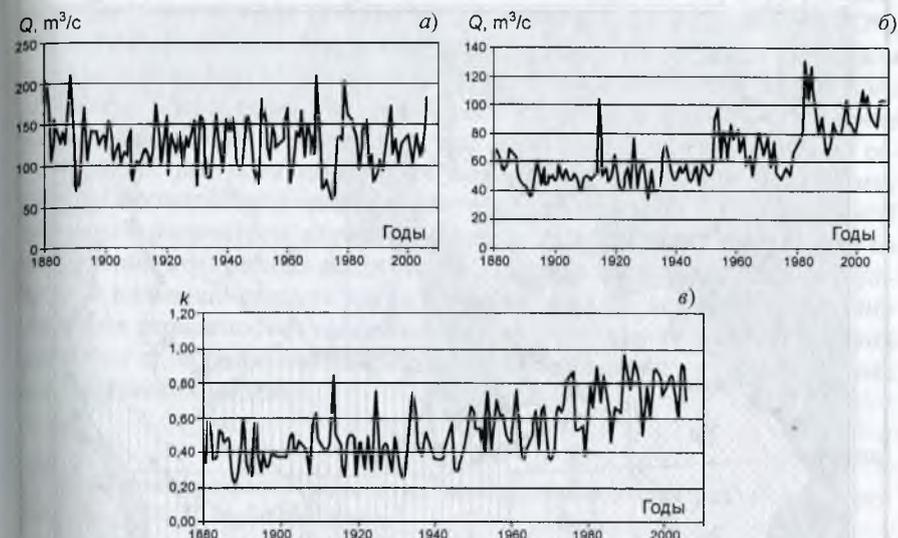
**Современные изменения годового и меженного стока с переоценкой естественных ресурсов подземных вод бассейна Дона.** По характеру водного режима Дон принадлежит к восточно-европейскому типу с резко выраженным весенним половодьем и относительно устойчивой летней меженью. Подземные воды играют заметную роль в питании рек бассейна. Их доля зависит от целого ряда факторов: местоположения и размера водосбора, рельефа, почв, геологического строения, гидрогеологических условий и др. В наиболее засушливой части малые реки в межень пересыхают.

Для дальнейших расчетов величина годового меженного стока рассчитывалась как средняя величина из зимних и летних его значений, которые наиболее полно отражают вариации подземной составляющей в течение гидрологического года. При наличии нескольких гидрометрических створов на одной реке величина подземной составляющей общего речного стока определялась по изменению меженного расхода воды в реке между двумя гидрометрическими створами [3].

Для имеющихся рядов восстановленного годового и меженного стока р. Дон проведен статистический анализ для всего периода наблюдений (1881–2005 гг.), и временных интервалов 1935–1969, 1970–2005 гг. [9]. Анализ рядов годового стока за 1881–2005 гг. показал наличие незначительной тенденции уменьшения стока, статистически достоверной лишь для нижних створов (р. Дон–Калач и р. Дон–ЦГУ). Отметим, что за 1970–2005 гг. она становится еще менее выраженной.

Основной особенностью современных изменений стока р. Дон является увеличение в последние десятилетия меженного стока. Для всех створов выявлены статистически значимые возрастающие тренды. Водность реки в период межени в 1970–2005 гг. была на 25–30% выше, чем за предшествующий многолетний период времени. С точки зрения дисперсии ряды меженного стока за рассматриваемые периоды времени являются однородными. Причиной изменения меженного стока р. Дон являются метеорологические факторы. Для оценки их роли были рассчитаны парные и множественные коэффициенты корреляции меженного стока с осадками за холодный и теплый периоды года. Коэффициенты корреляции меженного стока с осадками за холодный период предшествующего года равны 0,4–0,46, с осадками за холодный период со сдвигом два года – 0,3–0,38, с осадками за теплый период текущего года – 0,5–0,55. Множественный коэффициент корреляции меженного стока с вышеперечисленными переменными равен около 0,7–0,75. Связь меженного стока со значениями температуры воздуха как за холодный, так и за теплый периоды отсутствует. Для детального анализа изменений меженного стока в бассейне Дона рассмотрены его изменения практически по всем створам самой реки и ее притоков. Показано, что меженный сток отличается постоянным ростом за последние 30–35 лет (рис. 5). Более того, аналогичным ростом характеризуется также минимальный месячный сток за

год в низовьях Дона. В этом повышении могут сказываться попуски из Цимлянского водохранилища после 1952 г., но рост минимального стока наблюдался и до строительства плотины.



**Рис. 5.** Изменение годового (а), меженного (б) ( $Q$ ,  $m^3/c$ ) и доли меженного стока в общем объеме годового  $k$  (в) для р. Дон–Лиски, за 1880–2005 гг.

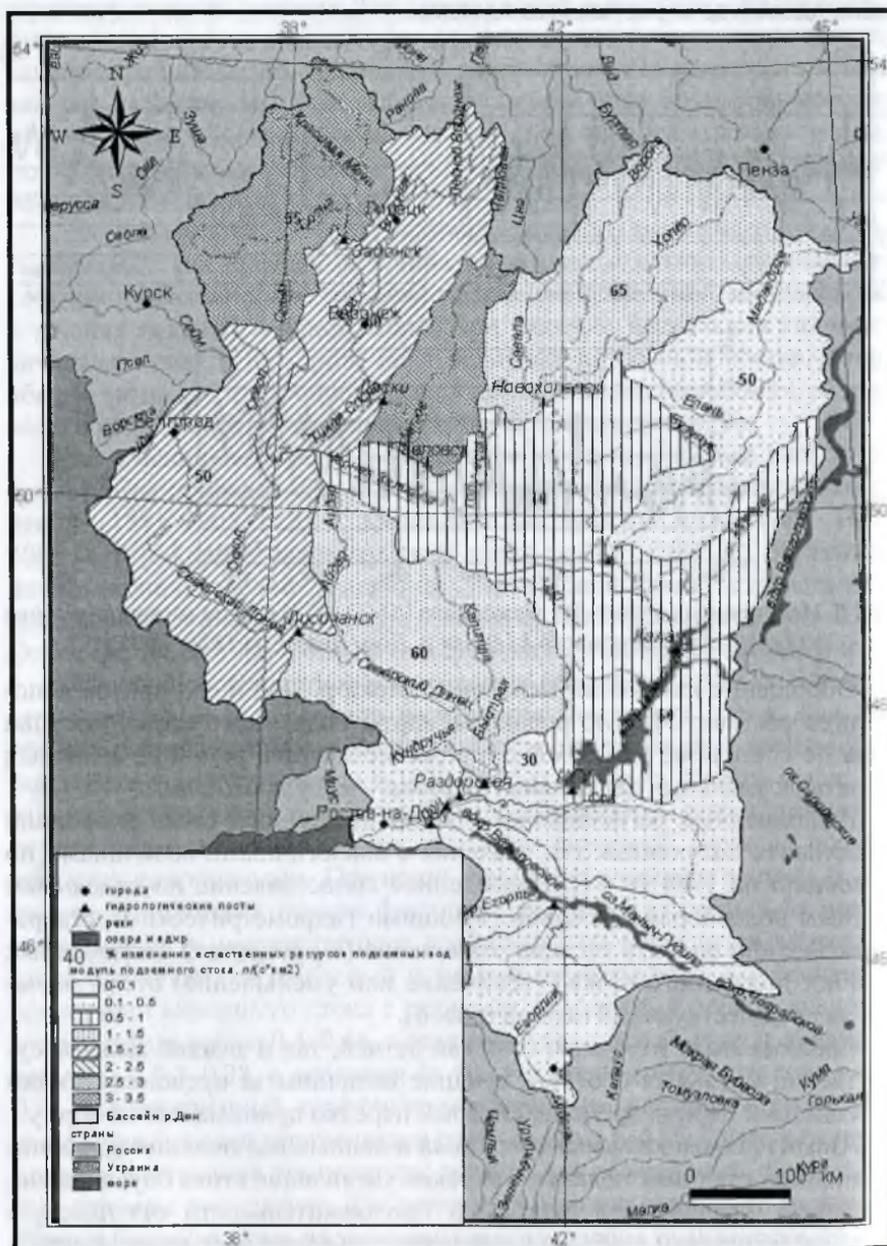
Обобщение изменений меженного стока р. Дон и его притоков позволило составить новую редакцию карты подземного стока бассейна Дона по состоянию на 2005 г. с отражением на ней одной из основных расчетных удельных характеристик стока – модуля в  $л/с \cdot км^2$ .

Выполненные региональные оценки подземного стока позволили сопоставить полученные его значения с аналогичными величинами по состоянию на 1974 г. [4]. Проведенное сопоставление по отдельным частным водосборам с соответствующими гидрометрическими створами позволило оценить степень отклонения (в процентах) современных величин подземного стока (увеличение или уменьшение) от их значений за предшествующий период (рис. 6).

Наблюдаемый месячный сток как летней, так и зимней межени существенно превысил соответствующие величины за предшествующий многолетний период времени, который нередко принимается за норму.

Анализ динамики меженного стока и данных наблюдений на водно-балансовых станциях показал, что такое увеличение стока обусловлено, во-первых, увеличением частоты и продолжительности оттепелей, а также уменьшением глубины и продолжительности промерзания почв и пород зоны аэрации; во-вторых – увеличением питания и повышением уровней подземных вод, дающих базовое меженное питание рек. По данным воднобалансовых станций (ВБС), расположенным в бассейне

Дона (Нижедевицкая ВБС, обсерватория «Каменная степь»), увеличение меженного стока достигает 50–60% [1].



**Рис. 6.** Карта подземного стока бассейна Дона по состоянию на 2005 г. (штриховые элементы соответствуют градиациям модуля подземного стока в л/с\*км<sup>2</sup> цифры – отклонение современных величин стока от их предыдущих оценок [4] в %

**Заключение.** Рассмотренные тенденции изменения водного режима рек ЕТР, проявляющие себя с середины семидесятых годов прошлого столетия, могут сохраниться, по крайней мере, на ближайшие 10–15 лет [8]. Увеличение зимнего стока может составить 60–90%, летнего – 20–50% в Центральном, Приволжском и Северо-Западном федеральных округах. На остальной территории увеличение меженного стока прогнозируется с большим разбросом – от 5 до 40%. Уточнение изменения величин подземного стока и соответствующих значений естественных ресурсов подземных вод на определенную перспективу следует проводить с учетом рассмотренных особенностей современной динамики параметров климатического и гидрологического режима на территории конкретных водосборов. При прогнозных оценках определенное внимание следует уделять вариантным расчетам на основе построения зависимостей меженного стока от гидролого-климатических факторов и использования результатов глобальных и региональных климатических моделей.

#### Литература

1. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шиклонова. – СПб: ГГИ, 2009. 600 с.
2. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Потребление воды: экологические, экономические, социальные и политические аспекты. М.: Наука, 2006. 221 с.
3. Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Кричевец Г.И., Сафронова Т.И., Сотникова Л.Ф., Громова Ю.В. Изменение подземного стока под влиянием климата и антропогенных воздействий // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 17–24.
4. Карта подземного стока территории СССР, Масштаб 1:2 500 000 – Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, Москва 1974.
5. Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М., Соколичина Н.Н., Суркова Г.В., Торопов П.А., Чернышев А.В., Чумаченко А.Н. Прогноз климатической ресурсообеспеченности восточно-европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: МАКС Пресс, 2008 г., 292 с.
6. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. 2008.
7. Подземный сток на территории СССР / Под. ред. проф. Б.И. Куделина. – Изд-во Московского университета. 1966.
8. Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияние на отрасли экономики России. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). М., 2005, 28 с.
9. Христофоров А. В. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Изд-во МГУ, 1988. 131 с.