

## **Изменение подземного стока р.Дон под влиянием климата<sup>1</sup>**

**Р.Г. Джамалов\*, Н.Л.Фролова\*\*, М.Б. Киреева\*\*, Т.И.Сафронова\***

*\* Институт водных проблем Российской академии наук*

*119333 Москва, ул. Губкина, 3*

*\*\* Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

*119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, Географический факультет*

В связи с наблюдающимися в настоящее время климатическими изменениями одной из наиболее актуальных задач гидрологии и гидрогеологии является оценка современных изменений естественных ресурсов поверхностных и подземных вод [1-3]. Изучение пространственно-временных закономерностей формирования речного стока для крупных речных бассейнов позволяет выявить основные соотношения между элементами водного баланса, особенности питания подземных и поверхностных вод и формирования их естественных ресурсов как при существующих климатических условиях, так и при прогнозируемых изменениях климата и основных его элементов (осадков, речного стока, испарения). В качестве объекта такого рода исследования был выбран бассейн р.Дон, чрезвычайно важный в хозяйственном отношении регион страны. Практически вся территория бассейна относится к области недостаточного увлажнения. По характеру водного режима Дон принадлежит к восточно-европейскому типу с резко выраженным весенним половодьем, с относительно устойчивой летней меженью. Подземные воды играют существенную роль в питании рек. Их доля зависит от целого ряда факторов: местоположения и размера водосбора, рельефа, геологического строения, почв и др. На реках Среднерусской возвышенности подземные воды формируют до 20-45% стока, на территории

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 09-05-00339; 09-05-92001-ННС; 10-05-00252), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (государственный контракт № 02.740.11.0336 и проект № П164).

к юго-востоку и востоку от нее — в пределах водосборов Тихой Сосны, Хопра и Медведицы — 15—20%, а в южной половине района, в частности в водосборах рек Иловли и Чира, 10—15% и менее. В наиболее засушливой части многие реки не обеспечены подземным питанием и в межень они пересыхают. Бассейн р.Дон относится к территориям, где происходящие климатические изменения наблюдаются особенно заметно по сравнению с остальными регионами России.

В ходе исследования решались следующие задачи:

- оценка произошедших климатических изменений в бассейне р.Дон на основе статистического анализа рядов температуры воздуха и осадков за теплый и холодный периоды года;
- выявление основных тенденций в изменении годового и межennaleго стока; характера внутригодового распределения стока;
- пространственно-временная оценка соотношений величин подземного стока с другими основными элементами водного баланса (осадки, испарение, речной сток);
- оценка изменений подземного стока и естественных ресурсов подземных вод в бассейне Дона;
- исследование явления отсутствия стока для малых рек и его динамика в условиях изменения климата.

## **ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В БАССЕЙНЕ ДОНА**

Для анализа изменения температуры воздуха и атмосферных осадков за холодный (XI-III месяцы) и теплый (IV-X месяцы) периоды года были использованы данные по 6 метеостанциям, относительно равномерно расположенным в бассейне р.Дон за 1928-2000 гг. с наиболее полными рядами наблюдений. Анализ временных рядов метеорологических характеристик был проведен для трех различных по длительности периодов: 1) с 1928 по

2000 г.; 2) с 1939 по 1969 г.; 3) с 1970 по 2000 г. Для всех периодов были рассчитаны средние значения, минимальные и максимальные значения, средние квадратические отклонения, непараметрические критерии тренда Спирмена в целях выяснения наличия у исследуемых рядов монотонного (возрастающего или убывающего) тренда. Критерий использует оценку  $rs$  – коэффициента корреляции между рангами членов ряда и номерами соответствующих лет [4]:

$$rs = \frac{12}{n^2 - 1} \left[ \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n tR_t - \left( \frac{n+1}{2} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(1)$$

Данный критерий тренда с уровнем значимости  $\alpha$  принимает гипотезу однородности, если  $|rs|\sqrt{n-1} < t\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ . Если  $rs\sqrt{n-1} \geq t\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ , то имеет место статистически достоверная тенденция к увеличению значений характеристик с ростом  $t$ . Если  $rs\sqrt{n-1} \leq -t\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ , то имеет место статистически достоверный убывающий тренд. При уровне значимости 5% превышение их абсолютных значений над критическим числом 1,96 означает наличие статистически достоверного возрастающего или убывающего тренда.

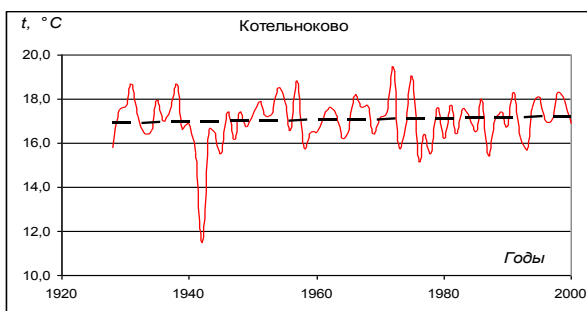
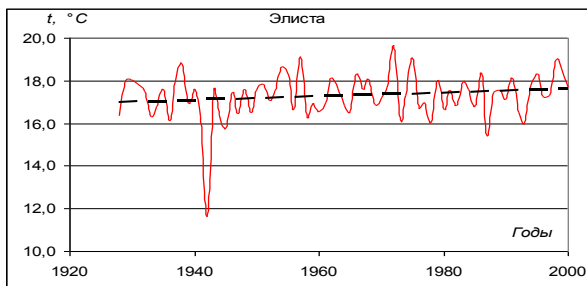
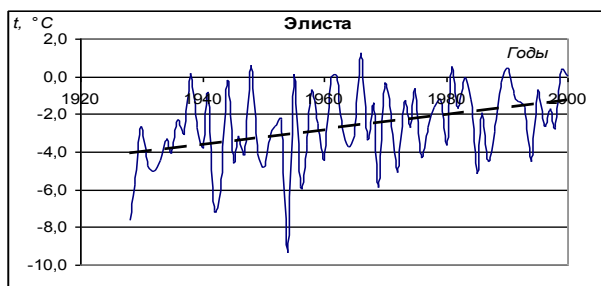
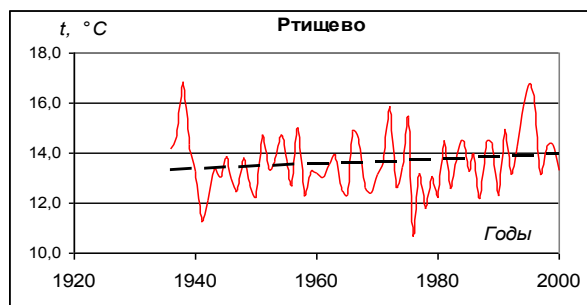
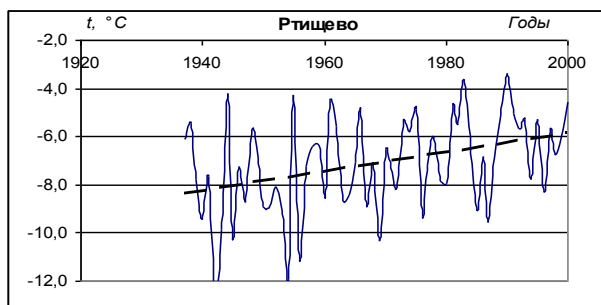
Для проверки статистической однородности исследуемых рядов с точки зрения их дисперсии, характеризующей амплитуду колебаний характеристик относительно их средних значений, использовался критерий Фишера. Критерий Стьюдента использовался для проверки гипотезы однородности средних значений [4]. Для проверки статистической однородности исследуемых рядов каждый ряд разбивался на два более коротких. Первый ряд  $n_1$  состоял из последовательных значений с 1939 по 1969 г. Второй ряд  $n_2$  состоял из оставшихся наблюдений, начиная с 1970 г.  $n_1$  и  $n_2$  в сумме составляют  $n$  – длину всего ряда наблюдений. Полученные для  $n_1$  стандартные оценки среднего  $M$ , среднего квадратического отклонения  $S$  сравнивались с аналогичными оценками, полученными для второго ряда. Кроме того, для оценки средней скорости увеличения (или уменьшения, если

тренд отрицательный) исследуемой переменной на рассматриваемом отрезке времени использовался коэффициент линейного тренда [5].

Увеличение средних температур воздуха за холодный период отчетливо прослеживается на всех метеорологических станциях, расположенных в бассейне Дона. Статистически значимый возрастающий тренд выявлен для станций Ртищево, Богучар, Котельноково и Элиста с коэффициентами линейного тренда, равными 0,4, 0,3, 0,42, 0,4°C/10лет соответственно (рис. 1). Средние температуры воздуха за теплый период также имеют тенденцию к увеличению, однако, она статистически незначима, а сама величина тренда колеблется в пределах 0,04-0,12°C/10лет.

Изменение сумм осадков за холодный и теплый период носит сходный характер с изменением средних температур воздуха (рис. 2). В холодное время года на некоторых метеостанциях происходит значительный рост осадков (16 мм/10 лет, м/с Ртищево; 14 мм/10 лет, м/с Целина) и зафиксирован статистически значимый возрастающий тренд; на других станциях (Котельноково, Дивное, Элиста) тенденция к увеличению проявляется менее заметно (всего в среднем 2-6 мм/10 лет). В теплый период года сумма осадков увеличилась незначительно, что и подтвердил статистический анализ временных рядов. Только для м/с Целина и для холодного, и теплого периода года наблюдается статистически значимое увеличение соответствующих сумм.

Результаты оценки статистической однородности все ряды были разделены на две части: 1939-1969 гг. и 1970-2000 гг. Проверка равенства средних значений проводилась по критерию Стьюдента  $t(M)$ , дисперсий – Фишера  $f(D)$ . Статистически значимое увеличение средних значений зафиксировано для рядов средней температуры воздуха за холодный период (м/с Ртищево, Богучар, Элиста) – разница в средних значениях составило 1,1-1,5°C, за теплый период эти изменения не являются статистически значимы, а разность температур в сторону их увеличения составляет 0,3-0,5°C.



**А)**

**Б)**

Рис. 1. Многолетние изменения средней температуры воздуха для холодного (XI-III) (А) и теплого периода (IV-X) (Б) (°C) (пунктиром показана линия линейного тренда) за 1928-2000 гг.

Определенных выводов об изменении дисперсии, характеризующей амплитуду колебаний метеорологических элементов относительно их средних значений, сделать нельзя. Критерий Фишера зафиксировал достоверное снижение дисперсии и, следовательно, амплитуды их ежегодных колебаний, по одному случаю для рядов температуры воздуха за холодный и теплый период, и его достоверное увеличение (м/с Ртищево) в одном случае для теплого периода. Коэффициенты линейного тренда средних температур воздуха за холодный и теплый периоды за рассматриваемый интервал времени (1970-2000 гг.) составляют 0,2-0,3°С/10лет.

Такая же ситуация характерна и для рядов сумм осадков за холодный и теплый периоды. Достоверное увеличение средним сумм осадков для двух рассматриваемых интервалов времени (1939-1969 и 1970-2000 гг.) зафиксировано для двух метеостанций из шести в случае холодного периода и для трех метеостанций для теплого периода. В первом случае это увеличение составляет около 10-20%, во втором - от 10 до 30%. Достоверное изменение дисперсии рассматриваемых рядов зафиксировано лишь для метеостанции Дивное (для сумм осадков за холодный период) и Целина (для сумм осадков за теплый период).

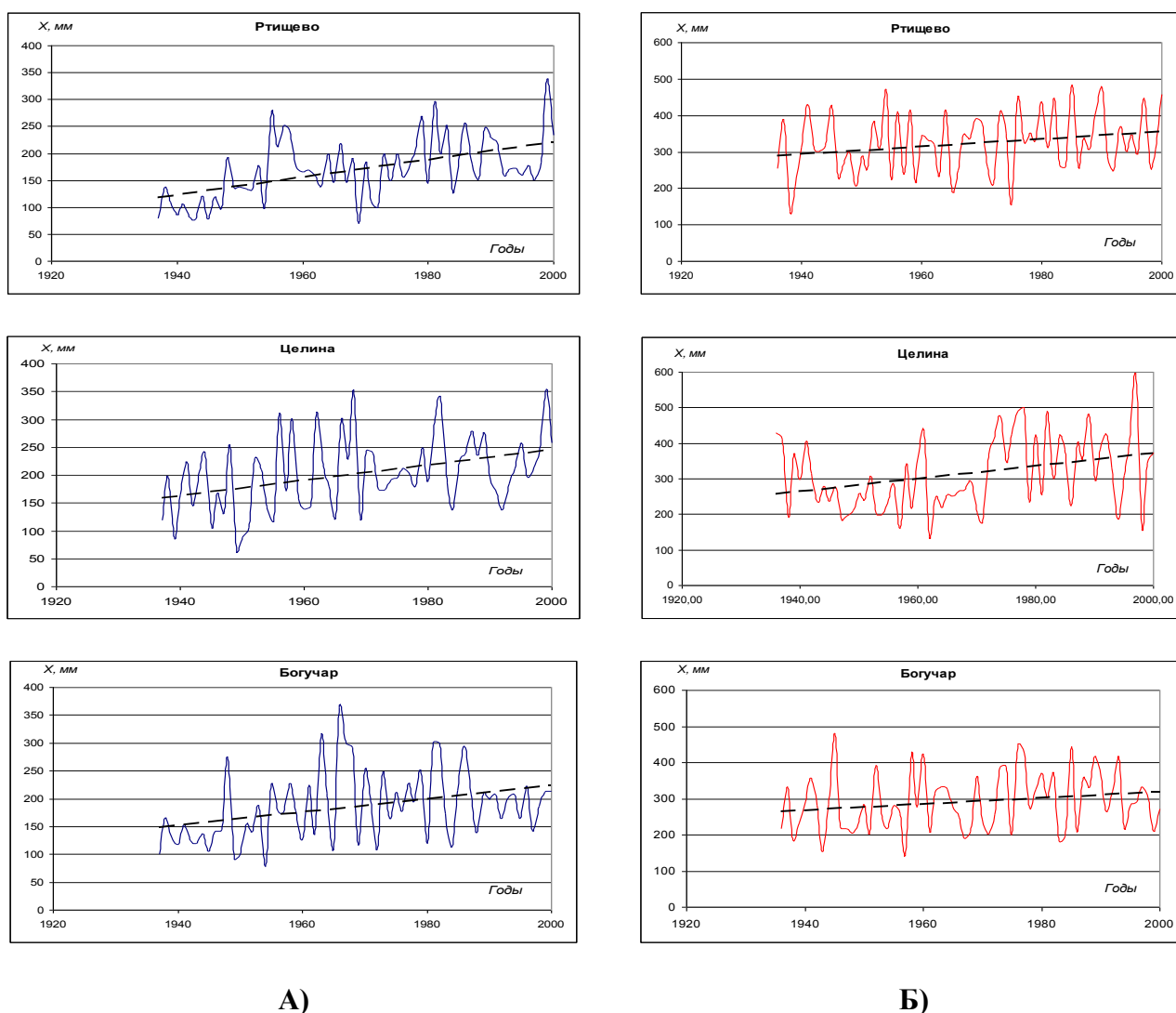


Рис. 2. Многолетние изменения сумм осадков для холодного (XI-III) (А) и теплого периода (IV-X) (Б) (мм) (пунктиром показана линия линейного тренда) за 1928-2000 гг.

Колебания сумм осадков за холодный период года и сумм положительных температур за этот же период, осредненных по данным более 100 метеостанций по всему бассейну Дона приведены на рис. 3. Средняя сумма осадков за холодный период с 1880 по 2000 г. увеличилась на 50 мм или на 35 %, а сумма положительных температур – на 150 градусов, т.е. возросла в 4 раза по сравнению с начальными величинами.

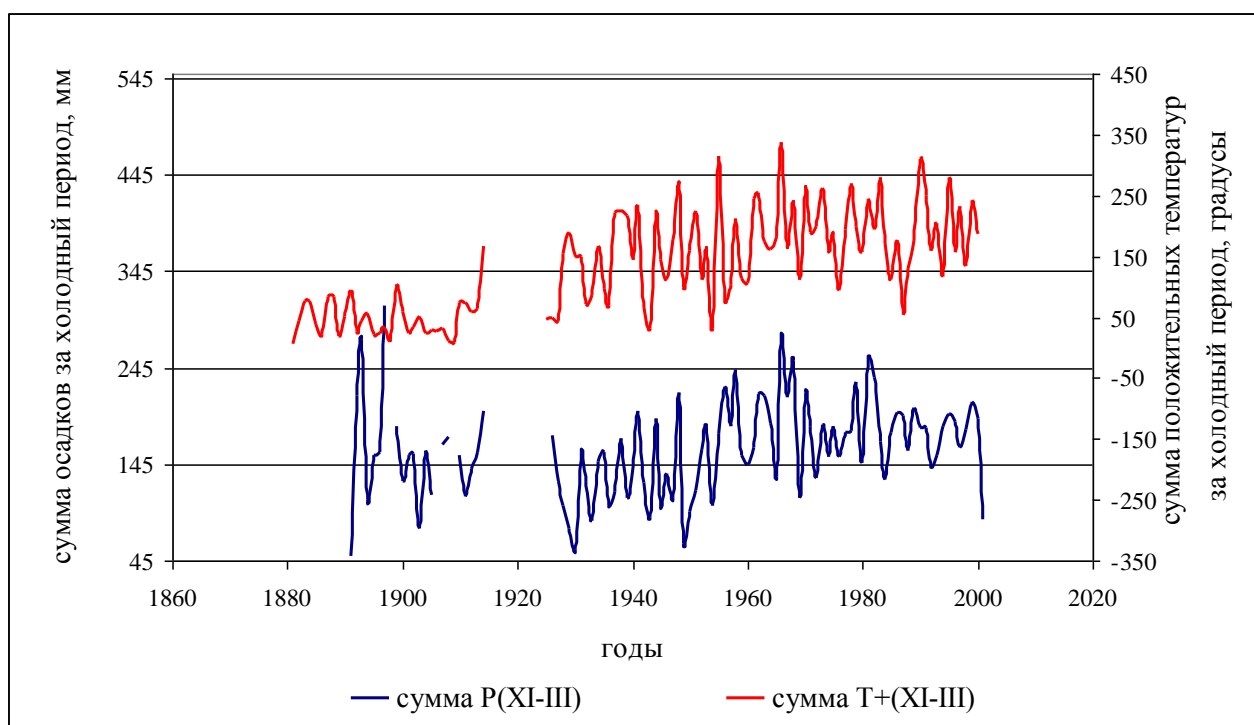


Рис. 3. Изменение суммы осадков и положительных температур за холодный период (XI-III) в среднем для бассейна Дона за период 1881-2000 гг.

### ИЗМЕНЕНИЕ ГОДОВОГО И МЕЖЕННОГО СТОКА РЕКИ ДОН

Климатические изменения, происходящие в последние десятилетия в бассейне Дона и в большинстве случаев весьма существенные, несомненно, влияют на величину годового стока, на особенности водного режима рек рассматриваемой территории, объем и высоту весеннего половодья, сток во время летней и зимней межени, подземный сток, на характеристики бессточных периодов пересыхающих рек.

Водные ресурсы бассейна р.Дон по данным [6] за период 1930-2005 гг. составляют 26,8 км<sup>3</sup>/год ( $C_v = 0,33$ ). Объем годового стока р.Дон у станицы Раздорская за весь период наблюдений - 1881-2005 гг. составляет 25,11 км<sup>3</sup>, при наибольшем значении - 49,9 км<sup>3</sup> в 1942 г. и наименьшем - 9 км<sup>3</sup> в 1972 г. В естественных условиях за период 1881-1951 гг. объем стока составил - 27,50 км<sup>3</sup> (средний расход - 873 м<sup>3</sup>/с); при регулировании и изъятии стока (1952-2000 гг.) - 21,58 км<sup>3</sup> (расход - 685 м<sup>3</sup>/с). Сток Нижнего Дона с 1952 г. регулируется Цимлянским водохранилищем. Большое влияние на сток Нижнего Дона оказывает р. Сев. Донец, бассейн которого подвергается интенсивному хозяйственному использованию. Северо-Донская шлюзованная система, объединяющая 7 низконапорных транспортных гидроузлов, введена в эксплуатацию в 1914 г. Существенному росту хозяйственного освоения р. Сев. Донец способствовал ввод в эксплуатацию в 1958 г. канала Сев.Донец – Донбасс с Краснооскольским (1958 г.) и Печенежским (1963 г.) водохранилищами.

В современное время естественный режим речного стока большинства не только больших, но и средних и малых рек, нарушен хозяйственной деятельностью человека, что приводит к изменению однородности многолетних рядов. Оценить степень влияния климатических и антропогенных факторов на речной сток возможно с помощью восстановления естественных характеристик стока. Эта задача выполнена по 1990 г. проектными институтами «Гидропроект» им. С.Я. Жука, институтом «Южгипроводхоз». Для решения поставленных в данной работе задач многолетние ряды годового стока продлены Л.Ф.Сотниковой по 2006 г. Для контроля точности процедуры восстановления стока продление рядов осуществлялось с помощью нескольких методик – регрессионных зависимостей и воднобалансовых соотношений. Стоковые ряды по р. Сев Донец приняты по данным «Схемы комплексного использования водных ресурсов СССР на период до 2005 года» в проработке Укргидропроекта.

Для створа Цимлянской плотины многолетний ряд был продлен и приведен к естественным условиям (условно-естественный сток) по воднобалансовой методике, где



учтен сток в створе Цимлянской плотины; сброс воды через гидроузел; забор воды в Донской магистральный канал и в Генераловскую оросительную систему; забор воды в Волго-Донской судоходный канал; испарение с зеркала водохранилища; изменение объема водохранилища. Источниками этих данных являются водные балансы гидрометслужбы.

Восстановление стока в створе Раздорской выполнено путем учета боковой приточности на участке Цимлянская – Раздорская и использования водных балансов водохранилища. Боковая приточность получена суммированием стока рек Сев.Донец, Кагальника и Сала.

Основные изменение стока за счет антропогенной деятельности, как показал анализ гидрологической и водохозяйственной информации в бассейне, выполненный ранее проектными организациями, складываются ниже Цимлянского водохранилища. Выше Цимлянского водохранилища потери стока за счет агролесомелиоративных мероприятий, промышленно-коммунального и сельскохозяйственного водопотребления незначительны как для Верхнего Дона (до г. Задонска), так и для Среднего Дона до г. Калач.

Для дальнейших расчетов величина меженного стока рассчитывалась как средняя величина из минимальных зимних и летних значений стока, которые наиболее полно отражают вариации подземной составляющей в течение гидрологического года. Для имеющихся рядов годового и среднего меженного стока (рис. 4, 5) р.Дон был проведен статистический анализ для всего периода наблюдений (1881-2005 гг.), 1935-1969, 1970-2005 гг. Также как и для метеорологических характеристик были рассчитаны средние значения, средние квадратические отклонения, параметры линейных трендов, а также статистические критерии Спирмена  $r_s$ , Стьюдента  $t(M)$  и Фишера  $f(D)$  (табл. 1). Кроме того, для всего ряда и его отдельных частей были рассчитаны первые коэффициенты автокорреляции  $r(1)$ .

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.

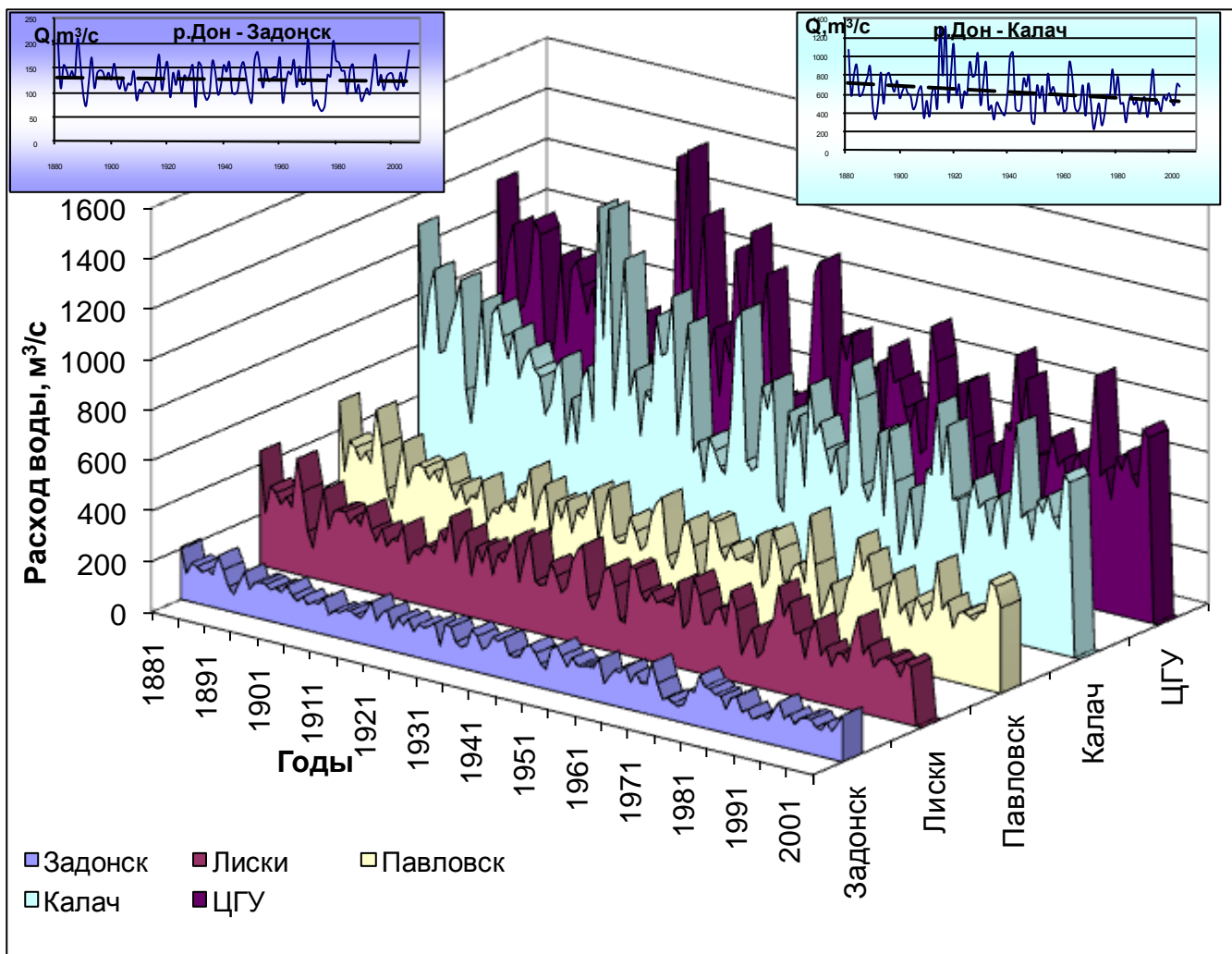


Рис. 4. Изменение среднего годового стока р.Дон за 1881-2005 гг. (на вставках пунктиром показана линия линейного тренда)

Таблица 1. Статистические характеристики рядов среднегодового и среднего межennaleго стока р.Дон

(выделены случаи статистически достоверных изменений)

| Характеристика   | Среднегодовой сток |                                      |              |              |        |        |        | Средний межennaleго сток |                                      |             |        |        |             |             |
|------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------|--------------|--------|--------|--------|--------------------------|--------------------------------------|-------------|--------|--------|-------------|-------------|
|                  | Среднее            | Среднее<br>квадр.<br>откло-<br>нение | $r_s$        | $t(s)$       | $r(1)$ | $t(M)$ | $f(D)$ | Среднее                  | Среднее<br>квадр.<br>откло-<br>нение | $r_s$       | $t(s)$ | $r(1)$ | $t(M)$      | $f(D)$      |
| <b>1881-2004</b> |                    |                                      |              |              |        |        |        |                          |                                      |             |        |        |             |             |
| р. Дон - Задонск | 127                | 31                                   | -0,05        | -0,52        | 0,16   |        |        | 64,5                     | 20,1                                 | <b>0,66</b> | 9,83   | 0,70   |             |             |
| р. Дон – Лиски   | 255                | 70                                   | -0,17        | -1,90        | 0,14   |        |        | 118,2                    | 35,9                                 | <b>0,48</b> | 6,02   | 0,50   |             |             |
| р.Дон - Павловск | 310                | 156                                  | -0,05        | -0,61        | -0,04  |        |        | 139,8                    | 48,4                                 | <b>0,51</b> | 6,55   | 0,58   |             |             |
| р. Дон - Калач   | 618                | 205                                  | <b>-0,28</b> | <b>-3,24</b> | 0,21   |        |        | 363,4                    | 16,2                                 | <b>0,75</b> | 12,55  | 0,72   |             |             |
| р. Дон - ЦГУ     | 656                | 219                                  | <b>-0,28</b> | <b>-3,17</b> | 0,21   |        |        | 53,6                     | 16,8                                 | <b>0,53</b> | 6,91   | 0,56   |             |             |
| <b>1935-1969</b> |                    |                                      |              |              |        |        |        |                          |                                      |             |        |        |             |             |
| 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 - ЦГУ     | 613                | 206                                  | 0,08         | 0,48         | 0,2    |        |        | 49,0                     | 13,5                                 | <b>0,51</b> | 3,37   | 0,09   |             |             |
| <b>1970-2004</b> |                    |                                      |              |              |        |        |        |                          |                                      |             |        |        |             |             |
| 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        |
| р. Дон - ЦГУ     | 574                | 157                                  | 0,21         | 1,26         | 0,22   | 0,88   | 0,58   | 69,6                     | 17,6                                 | <b>0,65</b> | 4,97   | 0,54   | <b>5,48</b> | 1,70        |

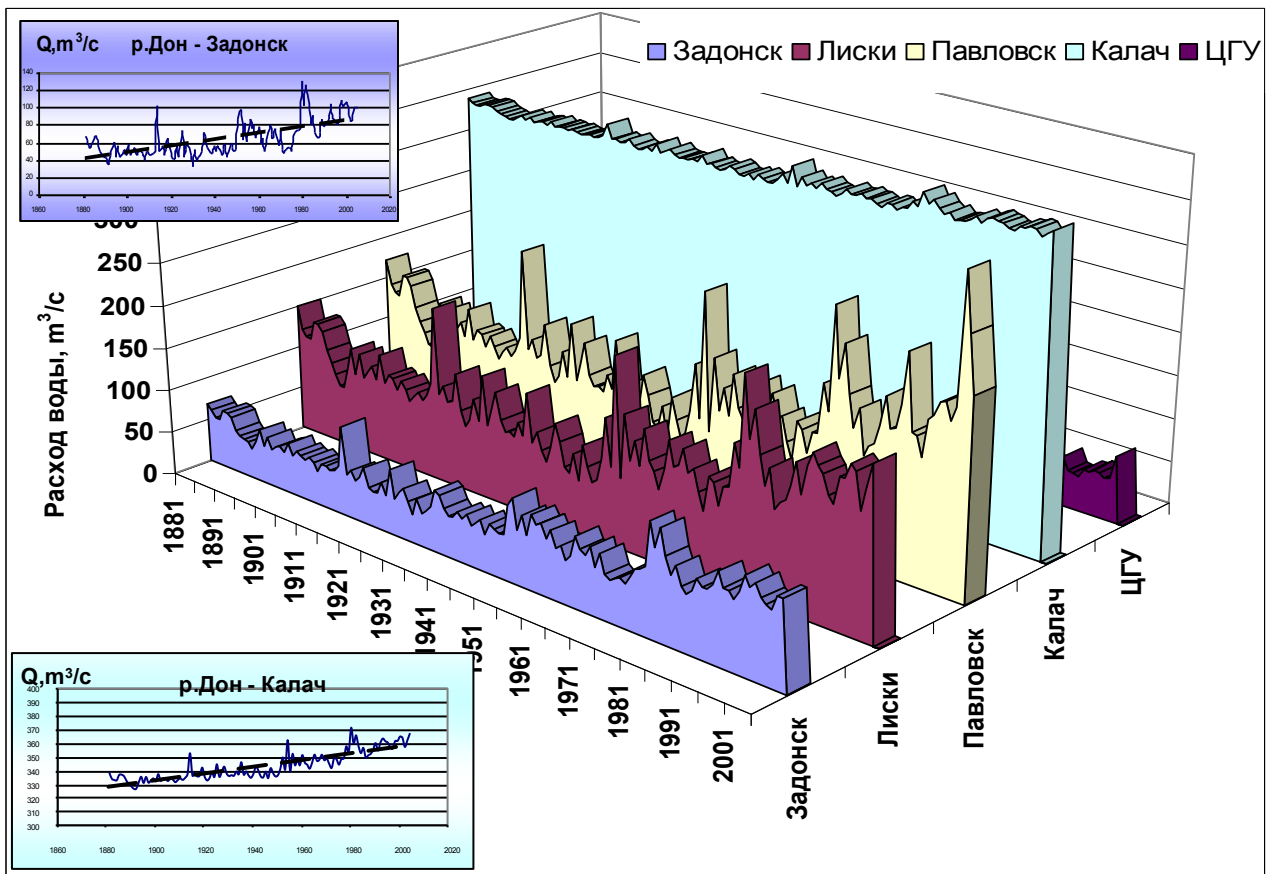


Рис. 5. Изменение среднего меженного р.Дон за 1881-2005 гг. (на вставках пунктиром показана линия линейного тренда)

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.

Если для рядов годового стока можно констатировать отсутствие корреляции между стоком смежных лет, хотя и увеличение первого коэффициента автокорреляции  $r(1)$  в период 1970-2005 гг. за счет увеличения подземного питания и меженного стока, то для рядов меженного стока наблюдаются очень высокие значения  $r(1)$  0,5-0,7. В качестве примера на рис. 6 показаны автокорреляционные функции годового и меженного стока р.Дон – Лиски.

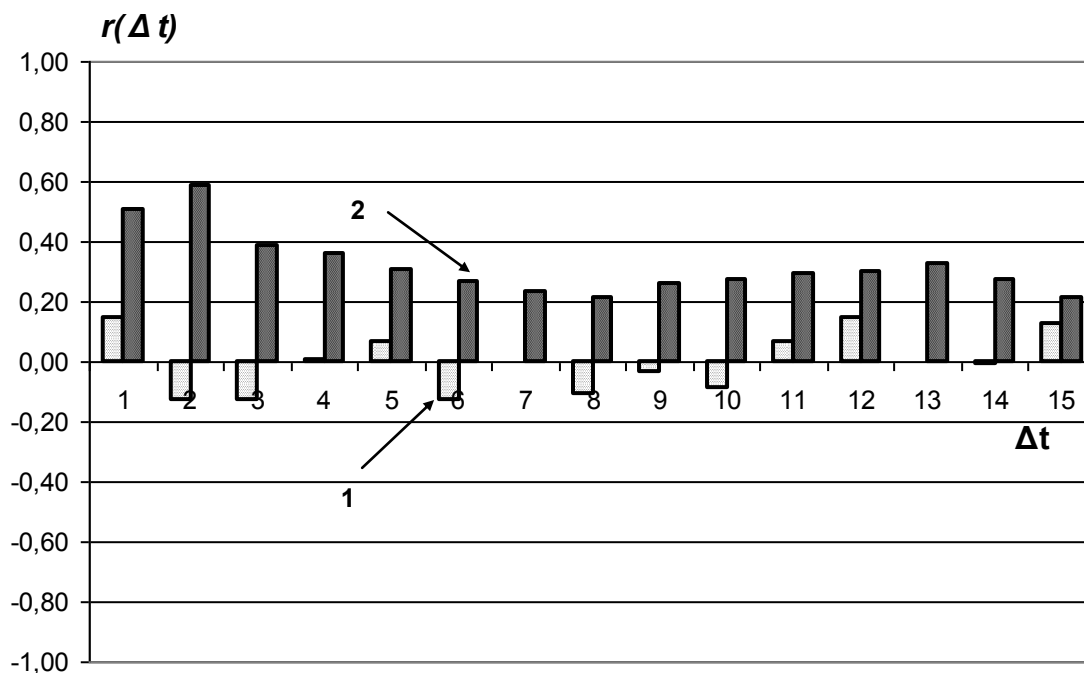


Рис. 6. Автокорреляционная функция  $r(\Delta t)$  годового (1) и межennaleго стока (2) р.Дон – Лиски

Вид этих функций подтверждает вывод М.В.Болгова [7] о том, что чем больше значение коэффициента автокорреляции стока смежных лет, тем медленнее затухают автокорреляционные функции стока периодов устойчивого питания.

Для детального анализа изменений межennaleго стока в бассейне Дона рассмотрены его изменения практически по всем створам реки и его притоков. Показано, что межennaleый сток отличается постоянным ростом за последние 30-35 лет (рис. 7). 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.

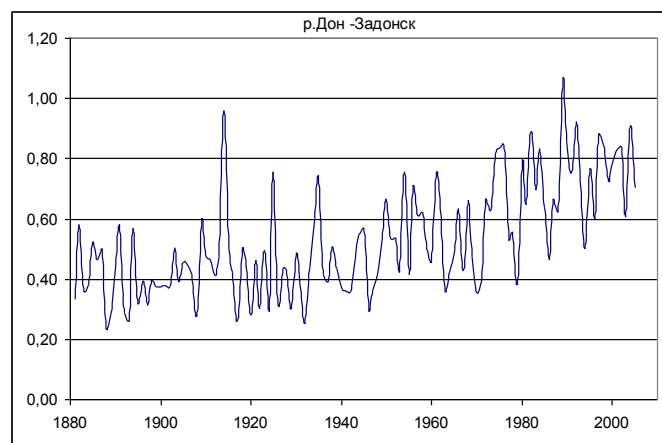
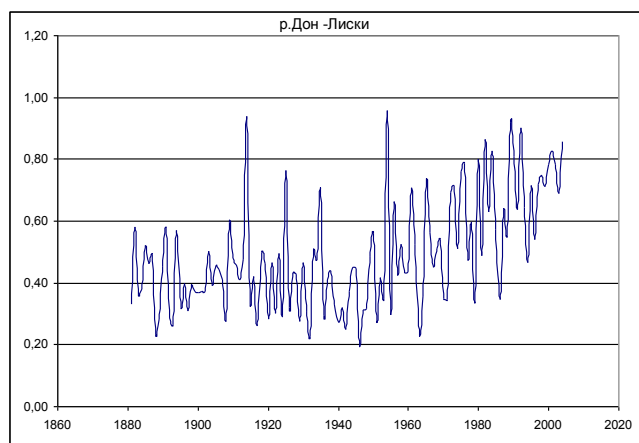


Рис. 7. Изменение доли меженного (в общем объеме годового) стока за 1880-2005 гг.

Обобщение изменений меженного стока р. Дон и его притоков позволило составить карту подземного стока бассейна Дона с учетом выполненных оценок удельных характеристик стока (модуля в л/с\*км<sup>2</sup>) по состоянию на 2000—2007 гг. Выполненные региональные оценки подземного стока дали возможность сопоставить полученные его значения с аналогичными величинами по состоянию на 1940—1969 гг. [8]. 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 30 летний период (рис. 8).

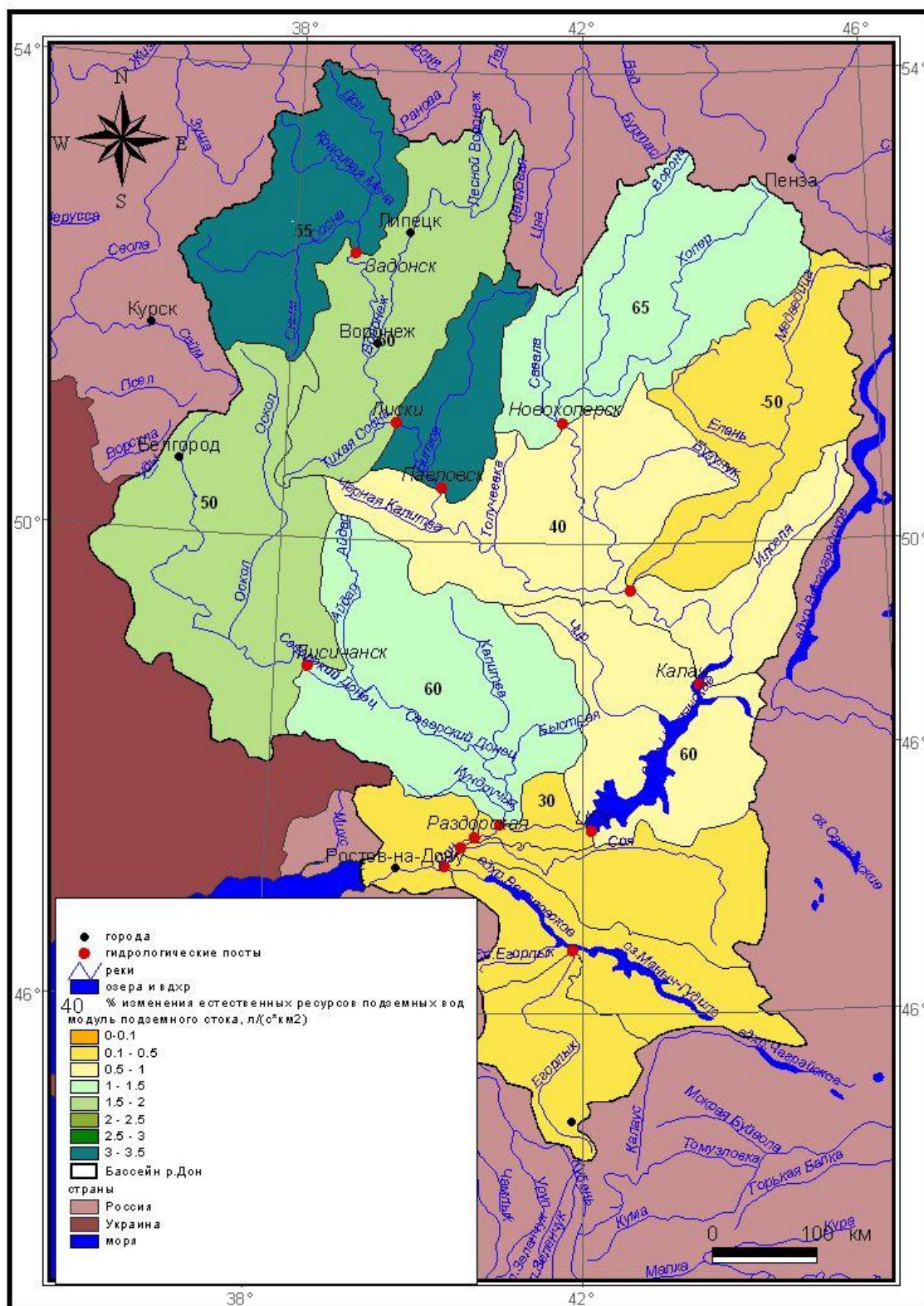


Рис. 8. Карта модуля подземного стока по состоянию на 2005 г. (штриховые элементы соответствуют грациям модуля подземного стока в л/с\*км<sup>2</sup>, цифры — отклонение современных величин стока от их предыдущих оценок [8] в процентах)

Наблюденный минимальный месячный сток как летней, так и зимней межени существенно превысил соответствующие величины за предшествующий многолетний период времени. Анализ динамики минимального стока и данных наблюдений на воднобалансовых станциях показал, что такое увеличение стока обусловлено, во-первых, увеличением частоты и продолжительности оттепелей (рис. 3), а также уменьшением промерзаемости почвы, во-вторых — повсеместным, вследствие тех же оттепелей, увеличением питания и повышением уровней подземных вод, дающих базовое меженное питание рек, которое распространяется и на летне-осеннюю межень. По данным воднобалансовых станций (ВБС) [6], расположенным в бассейне Дона (Нижнедевицкая ВБС, обсерватория «Каменная степь»), увеличение меженного стока, по данным ВБС, достигает 50-60%. В качестве основной причиной возрастания подземного питания рек и роста меженного стока приводится увеличение запасов подземных вод, хорошо подтверждается анализом зависимостей летне-осеннего и зимнего стока рек от среднего за сезон уровня подземных вод.

### **ЯВЛЕНИЕ ОТСУТСТВИЯ СТОКА В БАССЕЙНЕ ДОНА И ЕГО ДИНАМИКА**

Возникновение в течение года бессточных периодов на реках представляет собой сложное и многофакторное явление. Его исследование важно при изучении причин деградации малых рек и русловой сети в условиях изменения климата, оценке гидроэкологической безопасности территории, взаимосвязи подземных и поверхностных вод, изменении подземного стока.

Явление эпизодического прекращения стока в русле реки является сложным и в целом мало изученным процессом. Разнообразие физико-географических условий, сочетание разнообразных факторов обуславливает возникновение явления прекращения стока на реках самых разных размеров в различных регионах России. Существенной проблемой при изучении явления прекращения стока является возможная недостоверность используемой информации, а также наличие неполных данных о стоке малых рек.



Значительное влияние на прекращение стока рек оказывает хозяйственная деятельность. Очень часто по малым рекам информация о ней отсутствует и ее влияние трудно оценить. При этом данные о наличии или отсутствии явления прекращения стока имеют большое значение для водопользователей. Повторяемость и продолжительность этого явления являются ограничивающими водопотребление характеристиками и, соответственно, определяют возможности использования водных ресурсов. Особенно актуальна данная проблема в регионах с дефицитом воды и большими потребностями в ней (сельскохозяйственные районы бассейнов Дона, Терека и Кубани, Нижней Волги).

Явление прекращения стока в русле реки является наиболее экстремальным проявлением ее малой водности. Оно возникает при определенных сочетаниях гидрометеорологических условий и в отсутствии какого-либо из них может не наблюдаться. Пересыхание и перемерзание, представляя визуально одно явление - прекращение стока, имеют существенное генетическое различие. При пересыхании сток в реке отсутствует вследствие истощения подземного питания реки, а при перемерзании – подземные воды могут сохраняться, но в зоне питания реки переходят в твердое состояние в результате промерзания почвогрунтов или образования наледи. В соответствии с этим для возобновления стока в теплый сезон необходимо выпадение стокообразующих осадков, а в холодный сезон достаточно повышения температуры [9]. На реках России прекращение стока происходит во время зимней и летне-осенней межени, причем оно может наблюдаться как ежегодно, так и эпизодически.

Основными факторами, определяющими явление отсутствия стока, являются: площадь бассейна, его физико-географическое положение и гидрогеологические условия; общий запас воды в бассейне в период; предшествующий половодью, объем весеннего половодья; метеорологическая обстановка в весенне-летний период, характеризующая текущее увлажнение бассейна реки [9].

Исследование явления отсутствия стока на реках бассейна Дона проведено на основе многолетних статистических данных Государственного водного кадастра и «Ресурсов

поверхностных вод». Площади водосборов более чем 100 пересыхающих рек бассейна Дона, данные о которых использованы в работе, колеблются от 10 км<sup>2</sup> (р. Чибрик, с. Рождественское) до 19000 км<sup>2</sup> (р.Сал - с. Мартыновка).

Используемая для анализа метеорологическая информация включает суточные данные о температуре воздуха и количестве атмосферных осадков по 130 метеостанциям, расположенным в бассейне Дона и на прилегающих территориях.

В бассейне р. Дон явление пересыхания и перемерзания рек является типичной особенностью. На рис. 9 представлен типовой гидрограф пересыхающей реки - р. Токай (д. Ростоши). Ее водосбор, площадь которого составляет 620 км<sup>2</sup>, расположен в северной части бассейна Дона между реками Воронеж и Хопер. Она является притоком р. Свала, впадающей в Хопер в его среднем течении. Половодье р.Токай начинается в конце марта, для подобных рек характерно резкое увеличение расхода воды на подъеме половодья и паводков и постепенный спад после достижения максимальных значений, бессточный период, в среднем, начинается в конце июля и длится 2-2,5 месяца. В холодное время года характерно наличие дождевых паводков и оттепелей.

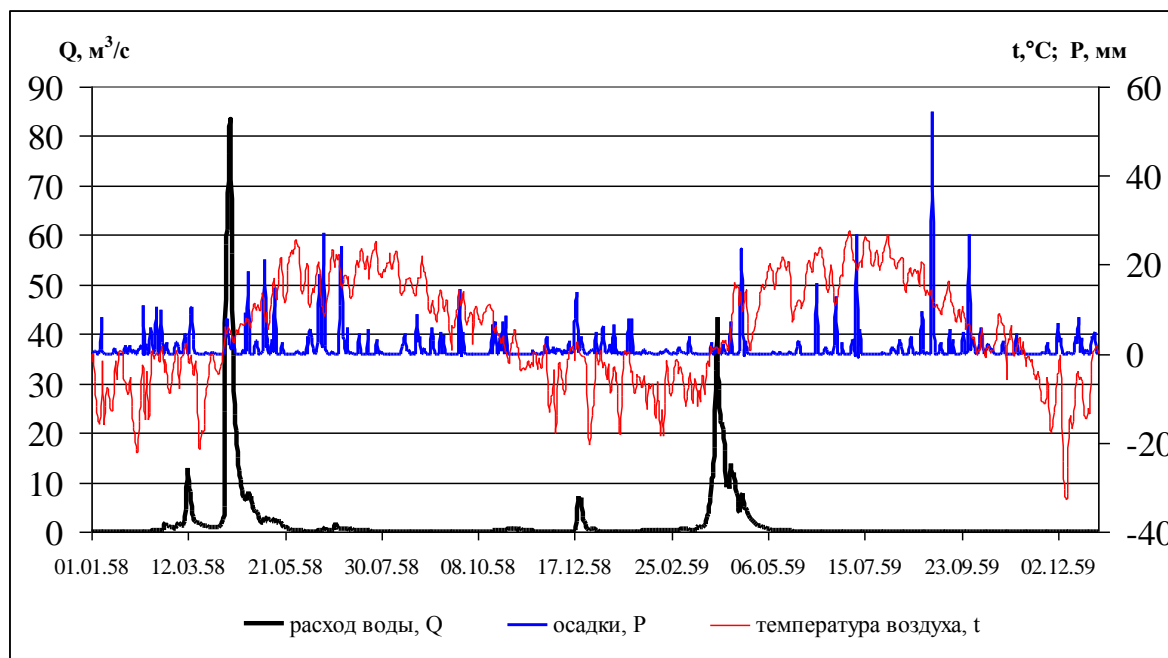


Рис. 9. Изменение расходов воды ( $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ ), осадков ( $P, \text{ мм}$ ) и температуры воздуха ( $t, \text{ }^\circ\text{C}$ ) для р. Токай- д. Ростоши ( $F = 620 \text{ км}^2$ ) за 1958-1959 гг.

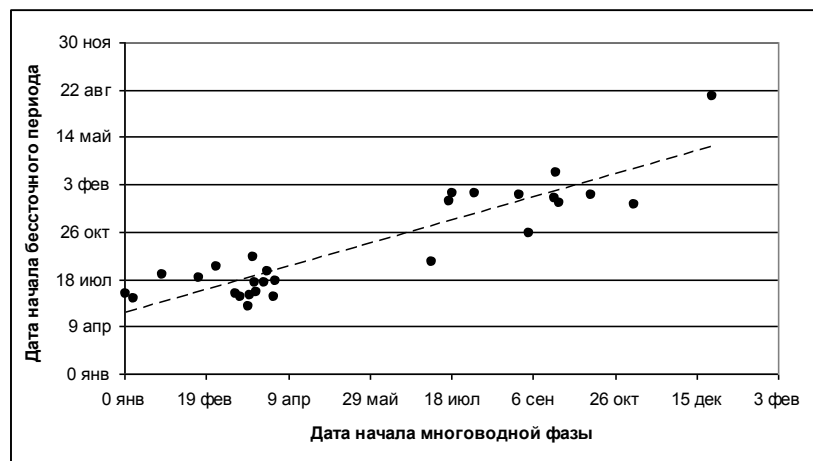
Изменения водного режима в бассейне Дона носят сложный характер. Для большинства рек наблюдается уменьшение среднегодового стока и увеличение меженного стока. Половодье смещается на более ранние сроки, а начало бессточного периода – на более поздние. Например, для р.Устиновка (п.Елань, 398 км<sup>2</sup>) начало половодья сместилось с конца марта на конец февраля, а начало бессточного периода – с конца мая на середину июня. Продолжительность бессточного периода для различных рек меняется по-разному: в большинстве случаев наблюдается тенденция к сокращению бессточного периода (для р.Устиновка - п.Елань она сократилась с 300 дней до 200 дней в году), однако, существуют реки, для которых она носит и противоположный характер.

В качестве основных характеристик бессточного периода рассматривается дата его начала и продолжительность. Однако продолжительность данного явления зависит не только от факторов, обуславливающих его возникновение, но и от причин, определяющих его конец. В данном случае причинами, обуславливающими окончание бессточного периода может быть как половодье следующего года, так и случайным образом выпадающие в течение этого периода осадки. В результате этого происходит прерывание бессточного периода, иногда на короткое время, иногда на более длительный период, поэтому построение расчетных и прогнозных зависимостей значительно усложняется. Возникает вопрос, в каком случае необходимо разделять бессточный период на два и более периодов при выпадении осадков и возникновении стока? Исходя из анализа имеющейся гидрологической информации по многим рекам бассейна Дона предлагается в качестве критерия прерывания бессточного периода взять временной интервал, равный 5-7 дням. При продолжительности стока «внутри» бессточного периода более 5-7 дней, он делился на два, при меньшей продолжительности паводок не учитывается (возникновением стока в данном случае считается превышение расхода, равным 1 л/с [9]).

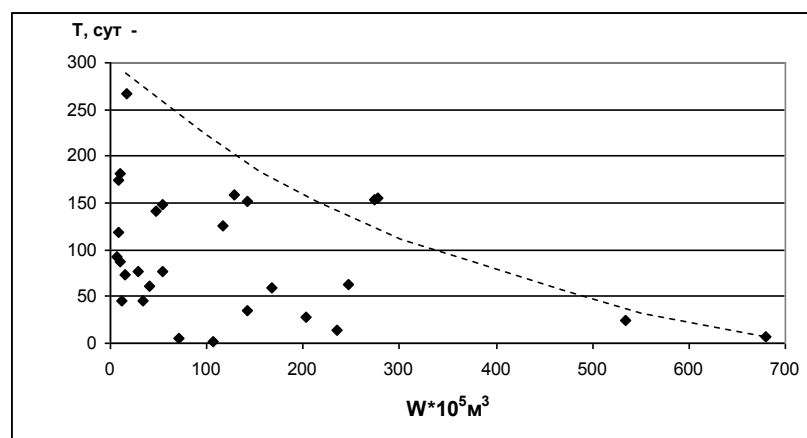
В качестве предикторов для расчета и прогноза начала и продолжительности бессточных периодов были выбраны: дата начала многоводной, предшествующей бессточному периоду фазы (это может быть как половодье, так и дождевой паводок); объем стока за эту многоводную фазу;

интенсивность спада после прохождения максимального расхода; количество осадков за период, предшествующий маловодному.

Зависимости даты начала бессточного периода от даты начала предшествующего многоводного периода имеют общий характер для всех постов. Они представляют собой линейные связи с коэффициентами корреляции более 0,85 (см. рис. 10а): Разница во времени этих двух дат отражает реакцию бассейна на поступление воды, его интегральную водовмещающую способность, включающую в себя русловые запасы, поверхностные емкости, запасы воды в подземных горизонтах. Каждый бассейн может характеризоваться величиной «продолжительности фазы стока», которая будет зависеть от его морфометрических характеристик (площади водосбора и глубины вреза). Это подтверждают построенные зависимости средней продолжительности фазы стока от площади водосбора рек бассейна Дона.



а)



б)

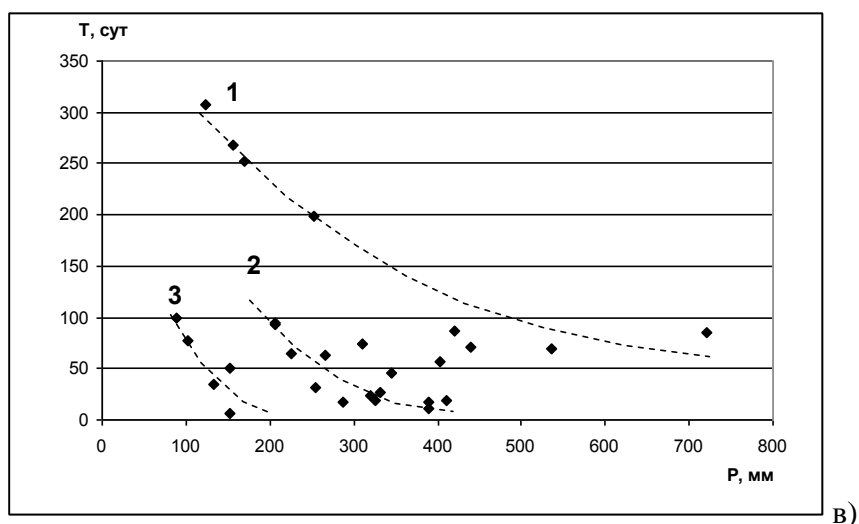


Рис. 10. Зависимость даты начала бессточного периода от даты начала многоводной фазы (а) для р.Тишанка – х. Кузнецов; связь продолжительности бессточного периода с объемом стока за половодья (б) и с суммой осадков за предшествующий период (в): 1-для весеннего половодья, 2 – для зимних паводков, 3-для осенних паводков

Зависимости продолжительности бессточного периода от объема стока за многоводную фазу, интенсивности спада носят размытый характер, угадывается лишь вид обратной связи. В таком случае, представляется возможным построение верхних огибающих (рис. 10б). Гораздо лучше выявляется зависимость между продолжительностью бессточного периода и суммой осадков за предшествующий период (рис. 10в). На рисунке выделяются 3 ветви, соответствующие весеннему половодью, осенним паводкам и оттепелям.

Многолетняя динамика явления пересыхания и перемерзания может быть рассмотрена на примере изменения соотношения пересохших в данном году рек и общего числа возможно пересыхающих рек (рек, на которых хоть раз за период наблюдений наблюдался бессточный период). Дополнительно исследуется динамика климатических изменений (суммы осадков за холодный период (XI-III месяцы) и суммы положительных температур за холодный период. В многолетнем ходе исследуемых метеорологических величин можно выделить три этапа: 1) с 1880 по 1930 г., когда значения, как суммы осадков, так и суммы положительных температур, были относительно постоянны, средние значения составляли примерно 145 мм и 50 градусов; 2) с 1930

по 1965 г., когда наблюдался интенсивный рост рассматриваемых показателей; 3) с 1965 по 2000 г., когда значения показателей относительно стабилизировались на новых отметках составляющих - 200 мм и 200 градусов.

Таким образом, средняя сумма осадков за холодный период с 1880 по 2000 г. увеличилась на 50 мм, т.е. приблизительно на 35 %, а сумма положительных температур – на 150 градусов по сравнению с начальными величинами. Такое значительное увеличение данных характеристик неизбежно привело и приведет в дальнейшем внутригодовой неравномерности стока рек, увеличению зимнего меженного стока. Влияние климатических изменений на объем весеннего половодья двояко: с одной стороны наличие оттепелей снижает величину снегозапасов, частично срабатывая их еще зимой и пополняя запас подземных вод, с другой – увеличение зимних осадков, в целом, увеличивает снегозапасы, тем самым, увеличивая объем половодья.

Связь суммы положительных температур и суммы осадков за холодный период выражается линейной зависимостью с коэффициентом корреляции 0,99 (рис. 11). Такая четкая закономерность объясняется преобладанием в данном районе теплых влагонесущих воздушных масс средиземноморского и атлантического происхождения, т.е. преобладанием западного типа циркуляции. Другой сходной теорией, объясняющей цикличность метеорологических процессов, является теория центров действия атмосферы. Согласно с ней, существует явление северо-атлантической осцилляции, во многом определяющее атмосферную циркуляцию над европейской территорией России [10].

Климатические изменения в бассейне р.Дон (увеличение как суммы положительных температур воздуха, так и осадков за холодный период) оказывают влияние на формирование экстремально низкой водности малых и средних рек, в том числе и явления отсутствия стока. Процент пересохших в данном году рек от общего числа возможно пересыхающих рек уменьшился с 60 (60-е годы XX в.) до 20 % (90-е годы XX в.) (рис. 12). Из-за увеличения числа оттепелей и суммы осадков за холодный период на большинстве пересыхающих рек наблюдается

увеличение объема половодья, смещение его сроков и сокращение продолжительности бессточных периодов.

В литературе для этой территории имеются сведения об уменьшении стока малых рек, которые не дренируют основные подземные горизонты [6]. Это происходит, по мнению авторов из-за того, что избыточная влага попадает через зону аэрации в подземные горизонты, дренируемые более крупными реками. Изучение столь сложного процесса требует дальнейшего детального исследования условий формирования весеннего половодья различных по размеру рек бассейна Дона в новых климатических условиях, изменения подземной составляющей стока на основе современных гидрометрических данных.

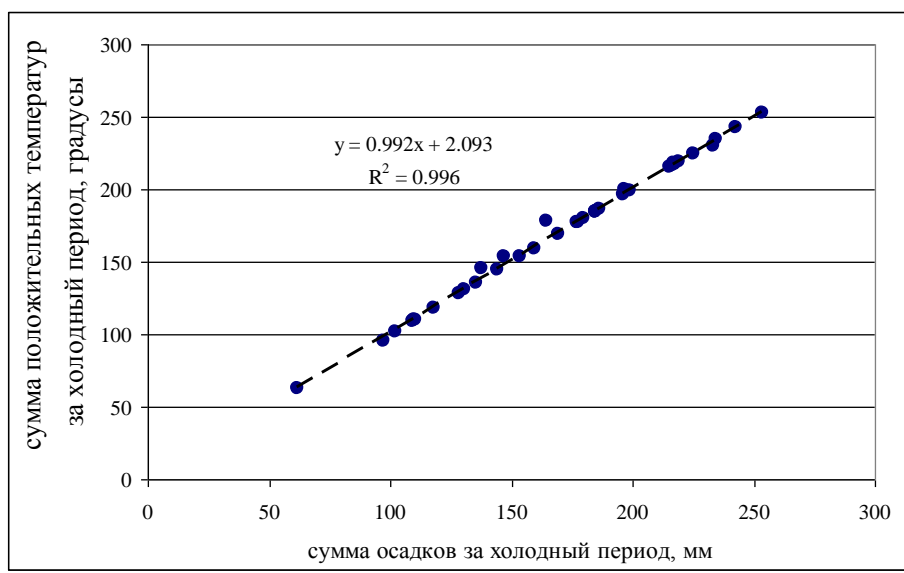
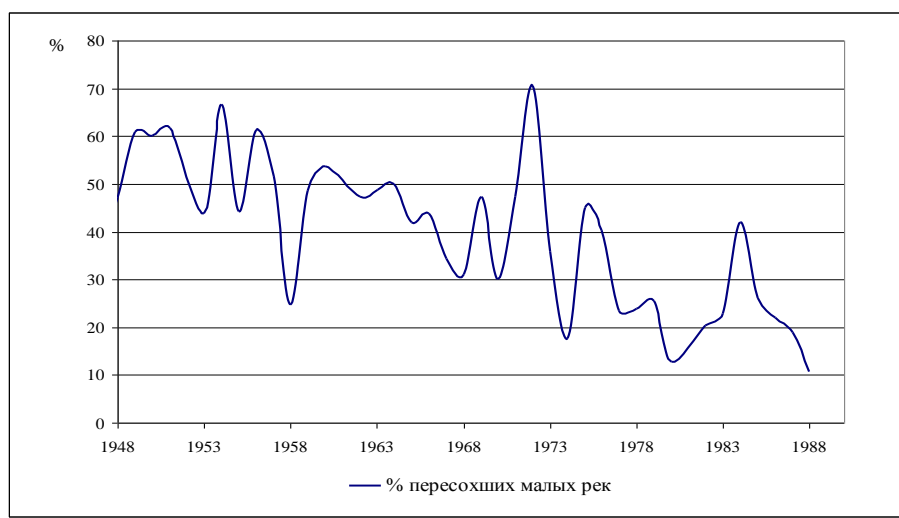


Рис. 11. Связь суммы осадков за холодный период и суммы положительных температур за холодный период (XI-III)



б)

Рис. 12. Изменение числа пересыхающих рек (% от всех рек бассейна Дона с явлением отсутствия стока)

### **Выводы:**

1. Статистический анализ рядов температуры воздуха и осадков за холодный (XI-III месяцы) период года показал наличие в большинстве случаев статистически достоверных возрастающих трендов с коэффициентами линейного тренда, равными  $0,3-0,4^{\circ}\text{C}/10\text{лет}$  и  $14-16\text{ мм}/10\text{ лет}$ . Средние температуры воздуха и осадков за теплый период (IV-X месяцы) также имеют тенденцию к увеличению, однако, она, как правило, статистически незначима, а сами величины трендов колеблются в пределах  $0,04-0,12^{\circ}\text{C}/10\text{лет}$  и  $4-10\text{ мм}/10\text{ лет}$ .

2. Анализ рядов годового стока р.Дон за 1881-2005 гг. показал наличие незначительной тенденции уменьшения стока, статистически достоверной лишь для нижних створов (р.Дон – Калач и р.Дон-ЦГУ). За период 1970-2005 гг. она становится еще менее выраженной.

3. 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.

4. Климатические изменения в бассейне р.Дон (увеличение как суммы положительных температур воздуха, так и осадков за холодный период) оказывают влияние на формирование экстремально низкой водности малых и средних рек, в том числе и явления отсутствия стока. Процент пересохших в данном году рек от общего числа возможно пересыхающих рек уменьшился с 60 (60е годы) до 20 % (90е годы). Из-за увеличения числа оттепелей и суммы осадков за холодный период на большинстве пересыхающих рек наблюдается увеличение объема половодья и сокращение продолжительности бессточных периодов.

### **Литература**



1. World water resources at the beginning of the 21st century. Project of IHP UNESCO. /Ed. Shiklomanov I.A. St. Petersburg, 1999. 395 p.
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.Н, 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. Христофоров А. В. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Изд-во МГУ, 1988. 131 с.
5. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. 2008.
6. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И. А. Шикломанова. – СПб: ГГИ. 600 с.
7. Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова Н.И. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения. М.: Наука, 2005 г., 317 с.
8. Карта подземного стока территории СССР, Масштаб 1:2500000 – Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, Москва 1977.
9. Владимиров А.В. Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометиздат,1976 г., 279 с.
10. Кислов А.В., Евстегнеев В.М., Малхазова С.М., Соколихина 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., 292с.
11. Куделин Б.И., Коробейникова З.А., Лебедева Н.А. Естественные ресурсы подземных вод Центрально-Черноземного района и методика их картирования. М.: Издательство Московского университета, 1963 г. 147 с.
12. Лурье П.М, Панов В.Д. Влияние изменений климата на гидрологический режим р.Дон в начале XXI столетия // Метеорология и гидрология.1999. № 4.С.90–100.