

УДК 502/504:551.585

**Г.Х. ИСМАЙЛОВ, Н.В. МУРАЩЕНКОВА**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РЕЧНОГО СТОКА БАСЕЙНА ВЕРХНЕГО ДОНА**

*В настоящей работе рассматриваются многолетние колебания годового и сезонного стока реки Дон за 126-летний период наблюдений. Для оценки причинных связей поверхностного стока с формирующими его климатическими факторами выполнен сопряженный анализ основных элементов водного баланса территории речного бассейна Верхнего Дона. Анализ многолетней динамики годового и сезонного стока (весеннего половодья, летне-осенней и зимней межени) реки Дон у г. Георгию-Деж и формирующих его климатических факторов выполнен на основе метода оценки линейного тренда с применением статистических критериев Стьюдента и коэффициента корреляции. Для оценки циклических изменений многолетних колебаний речного стока и определяющих его климатических факторов использован метод разностных интегральных кривых. Установлено, что за рассматриваемый 126-летний период среднемноголетний годовой сток имеет незначительное изменение, коэффициент линейного тренда составляет  $-0,6$  мм/10 лет. Наиболее существенные изменения наблюдаются в динамике стока весеннего половодья и межени. Сокращение весеннего стока за более чем 100-летний период составляет около 50% от его среднемноголетнего значения. Увеличение стока летне-осенней и зимней межени составляет соответственно 52% и 85% от среднемноголетнего значения стока. Четко выраженное изменение внутригодового перераспределения речного стока в бассейне Верхнего Дона происходит на фоне изменения температурного режима и режима увлажненности территории бассейна. На фоне повышенной увлажненности территории бассейна возрастает годовой слой суммарного испарения с поверхности речного бассейна. Среднемноголетнее значение годового слоя стока Верхнего Дона незначительно понижается. Но при наличии в бассейне ландшафтных особенностей (сильно расчлененный рельеф местности, наличие карстовых пород) наблюдается тенденция к увеличению аккумуляционных способностей бассейновых влагозапасов.*

*Речной сток, речной бассейн, колебания речного стока, атмосферные осадки, водные ресурсы, временной ряд, климатические факторы.*

**Введение.** Гидрологические исследования, посвященные оценке временных закономерностей речного стока в соотношении с природными факторами, участвующими в его формировании, являются в настоящее время наиболее актуальными в связи с проблемой управления водными ресурсами крупных водохозяйственных систем России. В последние годы указанные гидрологические исследования представлены многочисленными работами ряда авторов, ставящих на первый план вопросы изменения речного стока, обусловленного как климатическим,

так и антропогенным воздействием на водосборные территории речных бассейнов.

Климат является основным фактором формирования водных ресурсов (поверхностных и подземных) речных бассейнов. Климатические изменения современного периода протекают со скоростью, коррелирующей с темпами нарастания антропогенной нагрузки на окружающую среду. Дифференцированная оценка этой нагрузки на природную среду крайне трудна. Поэтому для оценки гидрологической роли тех или иных факторов используется анализ изменения

статистических характеристик временных рядов речного стока и формирующих его климатических факторов (температура воздуха, атмосферные осадки, суммарное испарение с поверхности речного бассейна и др.) за выбранные периоды времени.

В соответствии с данными метеорологических наблюдений на сети метеостанций в последние десятилетия (с середины 70-х годов XX века) отмечается четко выраженный тренд повышения годовой и зимней температуры воздуха. По данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) температура воздуха, как на планете в целом, так и на территории России будет повышаться в течение настоящего столетия. Изменение температурного режима атмосферы скажется и на проявлении крупных атмосферных вихрей – циклонов. Для территории Европейской части России преобладающим является западный перенос воздушных масс. Обильность атмосферных осадков речных бассейнов Европейской части страны зависит от водообильности преобладающих атлантических циклонов, которые, в свою очередь, формируют водность речных систем.

Таким образом, оценку закономерностей изменения речного стока за достаточно длительный период гидрометрических данных наблюдений (более 100 лет) необходимо проводить в сопряжении с его формирующими климатическими факторами.

#### **Материалы и методы исследований.**

Объект исследования – бассейн реки Дон в его верхнем течении до створа – г. Георгиу-Деж, площадь водосбора 69500 км<sup>2</sup>. Бассейн Верхнего Дона расположен в Центральном Черноземном регионе России в пределах лесостепной природной зоны недостаточного увлажнения. Годовая сумма атмосферных осадков составляет 528 мм/год, большая часть которых (75%) расходуется на испарение с поверхности речного бассейна. На распределение осадков по территории бассейна влияет атмосферная циркуляция и физико-географическая особенность расположения бассейна. Правобережье бассейна Верхнего Дона расположено на Среднерусской возвышенности, а левобережье – на Окско-Донской низменной равнине и Калачской возвышенности. Перепад отметок земной поверхности правобережной и левобережной частей бассейна составляет 198 м. Ландшафтной особенностью бассейна Верхнего Дона являются карстовые образования,

влияющих на режим и распределение водных ресурсов бассейна. Верхний Дон является одним из наиболее важных в хозяйственном использовании регионом страны. В его бассейне функционирует сложный водохозяйственный комплекс, включающий промышленное водоснабжение, в том числе тепловые и атомные станции, коммунальное водоснабжение, орошаемое земледелие, гидроэнергетику, водный транспорт и рыбное хозяйство.

Оценка временных закономерностей речного стока Верхнего Дона выполнена на основе использования многолетних (126-летних) данных гидрометрических наблюдений за стоком в створе – г. Георгиу-Деж на площади водосбора 69500 км<sup>2</sup> за период 1881/1882-2006/2007 гг. Для сопряженного анализа соотношения речного стока с климатическими факторами (атмосферные осадки, суммарное испарения с поверхности речного бассейна) использованы 126-летние временные ряды элементов водного баланса бассейна Верхнего Дона. Месячные и годовые значения суммарных атмосферных осадков в рассматриваемом бассейне получены по данным наблюдений, представленном на портале Мирового центра данных. Годовые и сезонные величины суммарного испарения с поверхности речного бассейна Верхнего Дона получены по результатам методики оценки суммарного испарения на основе использования многолетних данных атмосферных осадков и речного стока в исследуемом бассейне [1].

В настоящей работе для анализа многолетней динамики годового и сезонного (весеннего половодья, летне-осенней и зимней межени) стока реки Дон и формирующих его климатических факторов применен один из методов статистического анализа временных рядов гидрометеорологической информации – метод линейного тренда. Для оценки значимости линейного тренда использовались два статистических критерия – критерий Стьюдента и коэффициент корреляции, учитывающий связь между значениями временного ряда рассматриваемой гидрометеорологической характеристики и порядковыми номерами членов ряда.

Для оценки циклических многолетних колебаний речного стока и определяющих его климатических факторов был использован метод разностных интегральных кривых. Кривые построены для годовых и сезонных значений элементов водного

баланса (атмосферные осадки, речной сток и суммарное испарение) бассейна Верхнего Дона.

**Результаты исследований.**

При анализе многолетней динамики годового и сезонного стока реки Дон в створе г. Георгию-Деж за рассматриваемый 126-летний период установлено, что годовой сток имеет незначительное изменение, коэффициент линейного тренда составляет  $-0,6$  мм/10 лет. Наиболее существенные изменения наблюдаются в динамике стока весеннего половодья и межени. Статистический анализ временного ряда слоя стока весеннего половодья показал наличие статистически значимого отрицательного тренда. Сокращение весеннего стока за более чем 100-летний период составляет около 50% от его среднемноголетнего значения ( $74$  мм ( $5,14$  км<sup>3</sup>)). Еще более значимые изменения происходят с летне-осенним и зимним меженим стоком, характеризующим подземное питание реки. Увеличение стока летне-осенней межени составляет 52% от среднего

значения стока, равного  $29$  мм ( $2$  км<sup>3</sup>). Изменение зимнего стока за 126-летний период равно 85% от его среднемноголетнего значения, которое составляет  $14$  мм ( $0,97$  км<sup>3</sup>). Результаты статистического анализа многолетней временной динамики речного стока Верхнего Дона и формирующих его климатических факторов представлены в нижеприведенной таблице.

Ярко выраженное изменение внутригодового перераспределения речного стока в бассейне Верхнего Дона происходит на фоне изменения температурного режима и режима увлажненности территории бассейна. Как видно из полученных результатов, при увеличении атмосферных осадков (примерно на 30% от их нормы), участвующих в формировании весеннего половодья, резко возрастает величина суммарного испарения весеннего периода, скорость ее изменения составляет  $3,7$  мм/10 лет ( $46$  мм/126 лет) при норме суммарного испарения с поверхности речного бассейна, равной  $77$  мм/сезон.

Таблица

**Оценка многолетней динамики годового и сезонного стока Верхнего Дона и формирующих его климатических факторов за 126-летний период (1881/1882-2006/2007 гг.)**

| Период   | Среднее, мм | Уравнение тренда                 | Величина тренда, мм/126 лет | Коэффиц. линейного тренда, мм/10 лет | Критерий Стьюдента, t | Коэффициент корреляции, r | Значимость тренда |
|--|-------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------|
| <b>Речной сток (R)</b>   |             |                                  |                             |                                      |                       |                           |                   |
| Весеннее половодье   | 74          | $R_v = -0,278*t + 91,81$         | -35                         | -2,8                                 | 3,76                  | -0,32                     | значим            |
| Летне-осенняя межень   | 29          | $R_{л-о} = 0,119*t + 21,57$      | +15                         | +1,2                                 | 6,81                  | 0,52                      | значим            |
| Зимняя межень  | 14          | $R_z = 0,100*t + 7,57$           | +12,6                       | +1,0                                 | 8,11                  | 0,59                      | значим            |
| Год  | 117         | $R_g = -0,058*t + 120,95$        | -7,3                        | -0,6                                 | 0,74                  | -0,07                     | незначим          |
| <b>Атмосферные осадки (P)</b>  |             |                                  |                             |                                      |                       |                           |                   |
| Весеннее половодье   | 249         | $P_v = 0,620*t + 209,27$         | +78                         | +6,2                                 | 4,43                  | 0,37                      | значим            |
| Межень   | 279         | $P_m = 0,374*t + 254,82$         | +47                         | +3,7                                 | 2,69                  | 0,23                      | значим            |
| Год  | 528         | $P_g = 0,972*t + 466,15$         | +122                        | +9,7                                 | 4,82                  | 0,40                      | значим            |
| <b>Суммарное испарение (E)</b>                                       |             |                                  |                             |                                      |                       |                           |                   |
| Весеннее половодье   | 77          | $E_v = 0,371*t + 60,94$          | +46                         | +3,7                                 | 3,25                  | 0,28                      | значим            |
| Межень   | 336         | $E_m = -1,071*t + 404,28$        | -134                        | -10,7                                | 5,63                  | -0,45                     | значим            |
| Год  | 410         | $E_g = 0,557*t + 374,99$         | +70                         | +5,6                                 | 3,3                   | 0,29                      | значим            |
| <b>Изменение бассейновых влагозапасов (<math>\pm\Delta V</math>)</b> |             |                                  |                             |                                      |                       |                           |                   |
| Весеннее половодье   | -98         | $\Delta V_v = -0,446*t - 69,433$ | -56                         | -4,5                                 | 2,52                  | -0,22                     | значим            |
| Межень   | 0           | $\Delta V_m = -1,614*t + 101,71$ | -                           | -                                    | -                     | -                         | -                 |
| Год  | 0           | $\Delta V_g = -0,473*t + 29,79$  | -59                         | -4,7                                 | 3,01                  | -0,26                     | значим            |

За рассматриваемый 126-летний период в бассейне реки Дон в ее верхнем течении увеличивается среднемноголетнее годовое количество атмосферных осадков. На фоне повышенной увлажненности территории возрастает годовой слой суммарного испарения с поверхности речного бассейна. Среднемноголетнее значение годового слоя стока Верхнего Дона незначительно понижается. Вследствие наличия в бассейне особенностей ландшафта (рельеф местности сильно расчленен, наличие карстовых пород) наблюдается тенденция к увеличению аккумуляционных способностей бассейновых влагозапасов. Запасы воды содержатся как на поверхности бассейна реки, так и в почвогрунтах зоны аэрации и зоны насыщения. Как видно из представленной таблицы, среднемноголетнее годовое изменение бассейновых влагозапасов составляет  $-59$  мм. Отрицательное значение ( $-\Delta V$ ) изменения бассейновых влагозапасов свидетельствует о накопительной способности бассейна Верхнего Дона. Подобная ситуация наблюдается и в период весеннего половодья.

Следующим этапом настоящей работы является исследование циклических многолетних колебаний годового и сезонного стока Верхнего Дона. На основе анализа разностной интегральной кривой годового стока р. Дон у г. Георгиу-Деж (рис. 1) за весь период инструментальных наблюдений (1881/1882-2006/2007 г.г.  $n = 126$  лет) можно выделить два полных цикла изменения водности реки:

- первый цикл продолжительностью 34 года (1881/1882-1914/1915 гг.) включает в себя 21-летний многоводный период (1881-1901 гг.) и 13-летний маловодный период (1902-1914 гг.). Среднемноголетний сток более длительного многоводного периода составляет 129 мм/год ( $9 \text{ км}^3/\text{год}$ ). В этом периоде наблюдались годы аномально высокой водности, к которым относятся 1881 г., когда годовой слой стока ( $R_g$ ) составлял 204 мм/год ( $14 \text{ км}^3/\text{год}$ ), и 1888 г., слой стока  $R$  равнялся 203 мм/год. Среднемноголетний сток 13-летнего маловодного периода составил 100 мм/год ( $7 \text{ км}^3/\text{год}$ ).

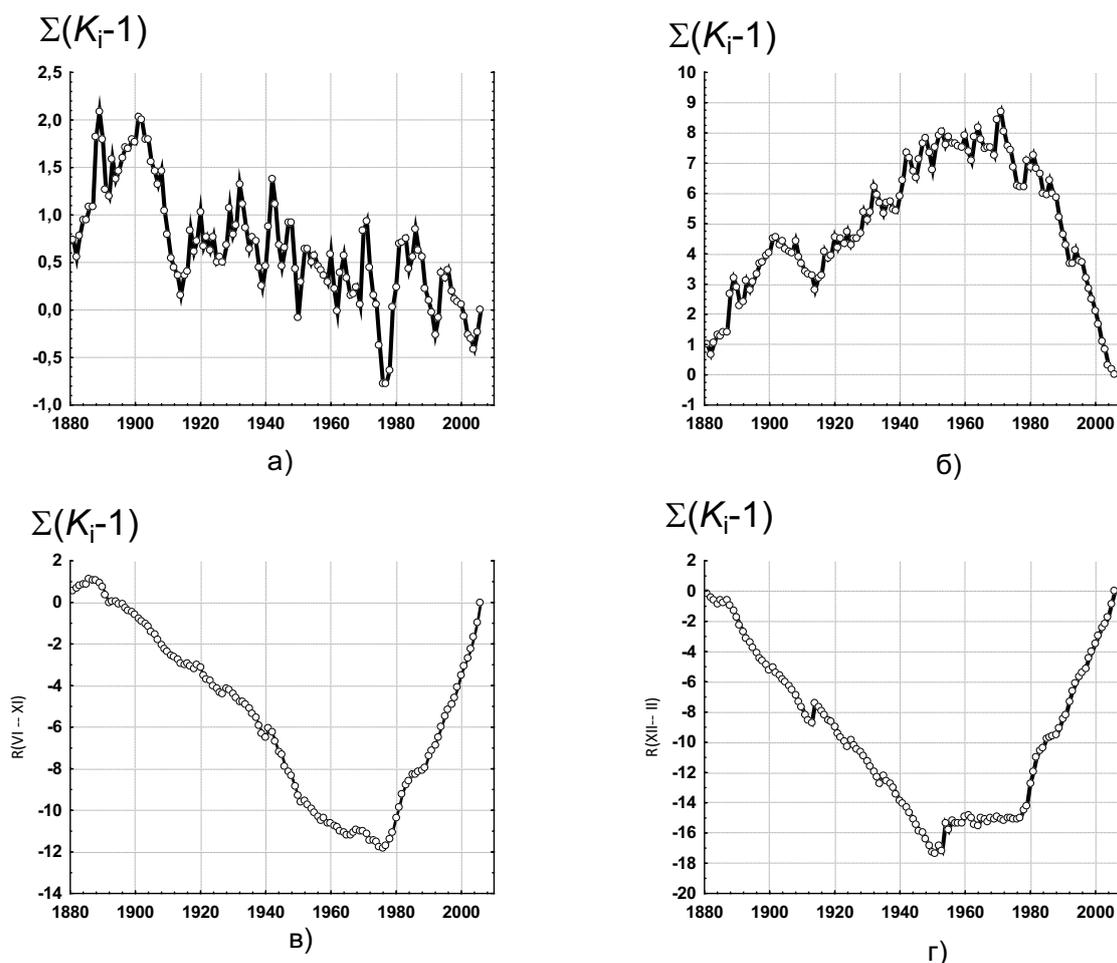


Рис. Разностные интегральные кривые годового и сезонного стока реки Дон у г. Георгиу-Деж за 126-летний период наблюдений:

а) годовой сток, б) сток весеннего половодья, в) сток летне-осенней межени, г) сток зимней межени

- второй цикл изменения водности реки Дон в верхнем течении имеет продолжительность 62 года, состоит из 28-летнего периода (1915/1916-1942/1943 гг.) повышенной водности и 34-летнего периода (1943/1944-1976/1977 гг.) пониженной водности реки. Долговременный многоводный период включает в себя наиболее часто повторяющиеся кратковременные 2-3-летние фазы подъема и спада стока реки. Длительный маловодный период, начинающийся в бассейне с 1943/1944 года и продолжающийся до 1976/1977 года, состоит из 2-3-летних и 4-5-летних фаз повышенной и пониженной водности реки. Особенно важно отметить 5-летний маловодный период 1972/1973-1976/1977 гг., в котором наблюдались крайне маловодные годы – 1972, 1973, 1975, 1976 гг., с годовым слоем стока от 60 до 82 мм (4,17-5,70 км<sup>3</sup>) при среднемноголетнем значении стока 117 мм (8,13 км<sup>3</sup>). Крайне маловодный 1976 год является переломным годом, после которого начинается 10-летний многоводный период, за которым следует ряд 5-7-летних периодов повышенной и пониженной водности реки. Следовательно, в течение длительного 126-летнего периода гидрометрических наблюдений за речным стоком Верхнего Дона преобладают 2-3-летние и 5-7-летние кратковременные многоводные и маловодные периоды. Данный вывод подтверждают результаты, полученные в работе [2]. В ней проведен анализ скрытых периодичностей в многолетних колебаниях годового и сезонного стока Верхнего Дона на основе использования метода автокорреляционных и спектральных функций.

В динамике сезонного стока реки Дон у г. Георгиу-Деж в отличие от годового стока отмечается четко выраженный один полный цикл изменения водности реки. В колебаниях стока весеннего половодья наблюдается долговременный многоводный период (1881/1882-1971/1972 гг.), который включает в себя 13-летний период маловодья (1902/1903-1914/1915 гг.) и длительный маловодный период 1972/1973-2006/2007 гг., прерывающийся периодом повышенной водности (1977/1978-1981/1982 гг.). Из рисунка видно, что точкой перехода от ветви подъема к ветви спада разностной интегральной кривой стока весеннего половодья является крайне многоводный 1970/1971 гг. Для стока летне-осенней межени переходным от маловодного периода к многоводному

является 1976/1977 гг., а для стока зимней межени – 1951/1952 гг. Как видно из разностной интегральной кривой, сток зимней межени с 1951/1952 по 1977/1978 гг. имеет период стабилизации, в течение которого его значения колеблются около нормы. Исходя из проведенного анализа можно отметить, что многолетние колебания годового стока носят более ритмичный характер, в отличие от стока весеннего половодья и межени, для которых характерен более монотонный режим.

### Выводы

1. Речной сток является интегральным показателем климата, следовательно, циклические изменения, выявленные в многолетних колебаниях годового и сезонного стока, отражают колебания климатических характеристик на территории речного бассейна Верхнего Дона.

2. Наблюдающееся внутригодовое перераспределение речного стока Верхнего Дона характерно для современных климатических условий, проявляющихся повышением как среднегодовой температуры воздуха, так и температуры воздуха холодного периода года, увеличением числа зимних оттепелей и снижением глубины промерзания почвогрунтов. Такие изменения гидрометеорологических условий приводят к повышению инфильтрационных потерь в речном бассейне, что вызывает увеличение подземного стока и снижение поверхностного стока реки.

3. Особую роль при формировании поверхностного и подземного стока речного бассейна после атмосферных осадков играют бассейновые влагозапасы. Они, аккумулируясь в речном бассейне в многоводные периоды и годы, в маловодные годы участвуют в формировании речного стока и суммарного испарения с поверхности речного бассейна.

### Библиографический список

1. Исмаилов Г.Х., Федоров В.М. Межгодовая изменчивость и взаимосвязь элементов водного баланса крупных речных бассейнов. // Водные ресурсы. – 2008. – Т. 35. № 3. – С. 259-276.

2. Исмаилов Г.Х., Мураценкова Н.В. Цикличность многолетних колебаний годового и сезонного стока бассейна Верхнего Дона. / Материалы международной научно-практической конференции «Экологическая,

промышленная и энергетическая безопасность – 2018». – Севастополь: СевГУ, 2018. – С. 494-498.

Материал поступил в редакцию 27.12.2018 г.

#### Сведения об авторах

**Исмайлов Габил Худуш оглы**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Гидрология, гидрогеология и регу-

лирование стока»; ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19;; e-mail: gabil-1937@mail.ru

**Мурасченкова Наталья Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидрология, гидрогеология и регулирование стока»; ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19; e-mail: splain75@mail.ru

**G.KH. ISMAIYLOV, N.V. MURASCHENKOVA**

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian university RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation

## INVESTIGATIONS OF TEMPORAL FLOW PATTERNS OF THE UPPER DON RIVER BASIN

*Fluctuations of the annual and seasonal flow of the Don River during the observation period of 126 years are considered in this paper. In order to assess the relationship between the surface runoff and climatic factors an analysis of the main elements of the water balance in the Upper Don river basin has been carried out. The analysis of the long-term dynamics of changes in the annual and seasonal runoff (spring flood, summer-autumn and winter low water) of the Don River near the city of Georhiu-Dej and the climatic forming factors is performed on the basis of the assessment method of the linear trend using statistical criteria. The method of differential integral curves was used to assess cyclical changes in river runoff and the climatic factors that determine it. It is established that over the 126-year period under consideration the average annual runoff has a slight change, the linear trend coefficient is  $-0.6 \text{ mm} / 10 \text{ years}$ . The most significant changes are observed in the dynamics of a spring flood and low flow. The spring runoff reduction over a period of more than 100 years is about 50% of its average annual value. The increase of the summer-autumn and winter low flow is 52% and 85% respectively of the average annual runoff. The clearly marked change of the annual redistribution of the river runoff in the basin of the Upper Don river occurs on the background of the change of the temperature regime and moisture regime of the basin territory. On the background of the higher moisture content of the basin area the annual layer of the total evaporation increases from the river basin surface. The average long-term value of the annual layer of the Upper Don flow decreases insignificantly. However in case the landscape features (the area relief is heavily partitioned, availability of karst rocks) there is observed a tendency to the increase of accumulative capabilities of the basin moisture reserves.*

*River runoff, river basin, river flow fluctuations, precipitation, water resources, time series, climatic factors.*

#### References

1. **Ismaylov G.Kh., Fedorov V.M.** Mezhdovaya izmenchivost i vzaimosvyaz elementov vodnogo balansa krupnyh rechnykh bassejnov / Vodnye resursy, 2008. T.35. № 3. S. 259-276.
2. **Ismaylov G.Kh., Muraschenkova N.V.** Ciklichnost mnogoletnih kolebanij godovogo i sezonnogo stoka bassejna Verhnego Dona / Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentcii «Ekologicheskaya, promyshlennaya i ehnergeticheskaya bezopasnost – 2018». Sevastopol: SevGU, 2018. – S. 494-498.

The material was received at the editorial office  
27.12.2018 г.

#### Information about the authors

**Ismaylov Gabil Khudushevich**, doctor of technical sciences, professor of the chair «Hydrology, hydrogeology and flow regulation» FSBEI HE RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d. 19; tel. e-mail: gabil-1937@mail.ru

**Muraschenkova Natalya Vladimirovna**, candidate of technical sciences, associate professor of the chair «Hydrology, hydrogeology and flow regulation» FSBEI HE RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d. 19; e-mail: splain75@mail.ru