

УДК 556.167:551.583

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДОЛГОСРОЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИНИМАЛЬНОГО СТОКА ПРИ АНТРОПОГЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

*В.В. Коваленко, Е.В. Гайдукова, Н.В. Викторова,
М.Н. Громова, Л.И. Лесничий*

Аннотация

В статье рассматривается модернизация известной методики оценки долгосрочных изменений минимального стока, основанной на использовании стохастической модели в виде линейного формирующего фильтра. С целью повышения статистической устойчивости решений и создания возможности учитывать в модели не только гидрометеорологические факторы формирования стока, но и факторы подстилающей поверхности, выполнено расширение фазового пространства, в котором производится поиск решения. В качестве дополнительных фазовых переменных привлечены годовой сток и испарение.

Ключевые слова: минимальный сток, стохастическая модель, неустойчивость, расширение фазового пространства, испарение.

Введение

Существующая в настоящее время нормативная база (СП 33-101-2003, [1]) для оценки долгосрочных изменений многолетнего речного стока (в том числе и минимального, как летне-осеннего, так и зимнего) ориентирована на использование фактических рядов наблюдений. По этим рядам строятся вероятностные распределения характеристик стока и по последним находятся обеспеченные значения расходов воды, лимитирующие проектные решения в различных водозависимых отраслях экономики и гидроэкологии. Подобная методика по умолчанию предполагает, что в статистическом смысле речные бассейны «застыли»: обеспеченные значения расходов воды, полученные по предшествующим десятилетиям, остаются неизменными в течение всего периода эксплуатации проектируемого сооружения, что входит в явное противоречие с принятой мировым научным сообществом точкой зрения о статистически значимом антропогенном изменении климата. Таким образом, появляется мотивация для разработки методики, учитывающей эволюционную изменчивость гидрологических процессов.

Недостатки аналогов и прототипа предлагаемой методики

Естественно, что мотивация подобных исследований появилась не сейчас. По крайней мере уже два десятилетия к этой проблеме приковано внимание гидрометеорологов. Предлагались различные пути ее решения. Самое простое решение (если его вообще можно считать таковым) заключается в том, чтобы

объявить возможные тренды вероятностных моментов рядов стока статистически незначимыми и указать уровень статистической значимости такого видения ситуации. При этом, чтобы обезопасить себя от возможных последствий такого наивного взгляда на процесс формирования стока, указать доверительный интервал неопределенности к обеспеченному значению расхода (ближайший аналог такого решения – 20%-ная гарантийная поправка к максимальному расходу 0.01%-ной обеспеченности).

Подобный подход может оказаться на первых порах вполне приемлемым с практической точки зрения. Однако эта «приемлемость» примерно такая же, как и при сооружении римских акведуков и мостов: никакой статистики тогда не знали, а древние водопроводы действуют до сих пор. О цене такого долголетия лучше и не спрашивать.

Ближайшим аналогом (прототипом) предлагаемого ниже решения является использование стохастической модели, описывающей формирование минимального стока как простой марковский процесс [2]:

$$dQ_{\min} = [-(\bar{c}_{Q_{\min}} + \tilde{c}_{Q_{\min}})Q_{\min} + \bar{N}_{Q_{\min}} + \tilde{N}_{Q_{\min}}] dt, \quad (1)$$

где Q_{\min} – расход (слой, модуль) летне-осеннего или зимнего минимального стока; $\bar{c} = 1/k\tau$, $\bar{N} = \dot{X}/\tau$ (здесь \bar{c} , \bar{N} – статистические нормы, \dot{X} – интенсивность осадков, k – коэффициент стока, τ – время релаксации); $\tilde{c}_{Q_{\min}}$, $\tilde{N}_{Q_{\min}}$ – взаимно коррелированные белые шумы.

Уравнение (1) статистически эквивалентно уравнению Фоккера – Планка – Колмогорова (ФПК):

$$\frac{\partial p(Q_{\min}, t)}{\partial t} = -\frac{\partial (A(Q_{\min}, t)p(Q_{\min}, t))}{\partial Q_{\min}} + 0.5 \frac{\partial^2 (B(Q_{\min}, t)p(Q_{\min}, t))}{\partial Q_{\min}^2}, \quad (2)$$

где $p(Q_{\min}, t)$ – плотность вероятности; A и B – коэффициенты сноса и диффузии, определяющие скорость изменения математического ожидания приращений расходов воды и их квадратов, соответственно (они зависят от физико-статистических свойств речных бассейнов и внешних, климатических воздействий на них, присутствующих в модели (1)).

Учитывая, что время релаксации речных бассейнов намного меньше такового для климатической системы, включающей мировую океан, любой климатический сценарий «с точки зрения речного стока» может рассматриваться как равновесное внешнее воздействие на речные бассейны. В этом случае решение уравнения (2) дается семейством кривых Пирсона, которые составляют основу инженерной гидрологии. Методика использования модели (2) для долгосрочных оценок изменений речного стока (включая минимальный) разбивается на два этапа: 1) ее параметризация по существующему режиму стока (например, по картам – приложение к СНиПу [3] или более современные карты) – обратная задача; 2) решение прямой задачи – «нахождение» (прогноз) кривой $p(Q_{\min})$ по сценарным климатическим характеристикам (осадкам и температуре воздуха).

Эта методика прошла широкую апробацию, направленную на обоснование достоверности получаемых результатов, расширение ее функциональных возможностей и областей практического приложения. Например, в диссертации

Н.В. Викторовой [4] были выявлены на ретроспективном материале ряды наблюдений за многолетним стоком рек ЕТР, на которых наблюдались достаточно продолжительные маловодные и многоводные периоды (аналоги климатических изменений). С их помощью по различным критериям согласия проверялась возможность «замораживания» некоторых параметров модели.

В диссертации Е.В. Гайдуковой [5] прогнозные карты минимального стока бассейна р. Оби использовались для оценки чувствительности критериев рационального размещения режимной гидрологической сети наблюдений к возможным изменениям климата.

М.Н. Громова [6] применила рассматриваемую методику для долгосрочных оценок характеристик выбросов минимального стока (частоты и продолжительности пребывания случайного процесса за уровнем 80%-ной обеспеченности) на территории России.

Тем не менее, несмотря на широкое применение и признание методики (она вошла в учебные программы для ВУЗов, ее идеи развиваются в научных исследованиях, поддержанных грантами, в том числе и международными), имеется особенность, ограничивающая ее дальнейшее продвижение. Она заключается в том, что коэффициент стока k принят как отношение многолетней нормы летне-осеннего или зимнего минимального стока к многолетней норме годовых осадков. Эта мера – вынужденная, так как выделить стокообразующие осадки для минимального стока практически невозможно, а если это было бы возможно, то все равно климатические сценарии их не содержат. Получены результаты [7], показывающие, что между нормой минимального стока и нормой годовых осадков существует статистически значимая связь. Следовательно, принятие такого (несколько фиктивного) коэффициента минимального стока для того круга задач, о которых упоминалось, вполне обоснованно.

Проблемы возникают в двух случаях.

1. Из-за ограниченности рядов наблюдений в инженерной гидрологии учитываются лишь три начальных момента m_i ($i = 1, 2, 3$), достаточных для получения расчетных гидрологических характеристик: нормы (m_1), коэффициенты вариации ($C_v = f(m_1, m_2)$) и асимметрии ($C_s = f(m_1, m_2, m_3)$). В связи с этим уравнение ФПК аппроксимируется системой дифференциальных уравнений для моментов. Исследование же их решений на устойчивость [8] выявляет критерий $\beta = G_{\tilde{c}} / \bar{c}$ (здесь $G_{\tilde{c}}$ – интенсивность шума \tilde{c}), в зависимости от значений которого можно судить о потере моментами устойчивости. При $\beta = 0.67$ теряет устойчивость третий момент (а значит, и коэффициент асимметрии), при $\beta = 1$ – второй момент (и коэффициент вариации), при $\beta \rightarrow 2$ теряет устойчивость все распределение в целом. Практическое применение этого критерия к летне-осеннему стоку ЕТР показало, что большая часть территории неустойчива по C_v , а кроме того, в южных регионах имеется тенденция к неустойчивости всего распределения $p(Q_{\min})$ (рис. 1, а).

2. Климат не является единственным источником долговременных изменений речного стока. Не менее важен учет влияния факторов подстилающей поверхности (озерность, заболоченность, залесенность речных бассейнов; степень их урбанизации, зависящая от плотности населения, и т. п.). При использовании

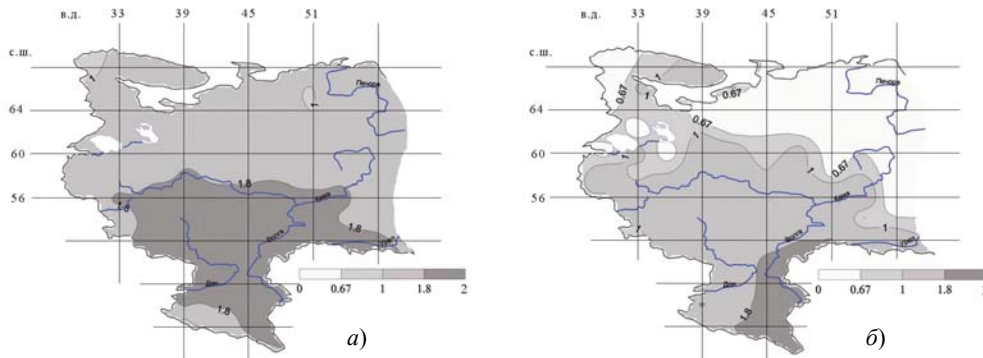


Рис. 1. Распределение зон неустойчивости ЕТР для летне-осеннего минимального стока при $k_{\min} = \bar{Q}_{\min} / \bar{X}_{\text{год}}$ (а) и при $k'_{\min} = \bar{Q}_{\min} / \bar{Q}_{\text{год}}$ (б)

«фиктивного» коэффициента минимального стока $k_{\min} = \bar{Q}_{\min} / \bar{X}_{\text{год}}$ невозможно учесть эти факторы. Приходится строить региональные зависимости этого коэффициента от перечисленных факторов (такой опыт в отношении залесенности и заболоченности получен при апробации модели для Украины и Прибалтики [4]). В то же самое время для коэффициента годового стока $k_{\text{год}} = \bar{Q}_{\text{год}} / \bar{X}_{\text{год}}$ подобные зависимости получены в разных вариантах в большом количестве и давно культивируются в гидрологии [9, 10].

В силу этих двух обстоятельств появляется мотивация к дополнению методики оценки долгосрочных изменений вероятностных характеристик минимального стока такими элементами, которые бы устраняли подобные недостатки.

Уточнение методики

Связь между $\bar{X}_{\text{год}}$ и \bar{Q}_{\min} действительно наблюдается, но не осадки непосредственно формируют минимальный сток (зимой выпадают только твердые осадки, но зимний минимальный сток от этого не прекращается). Кроме того, с помощью коэффициента k_{\min} трудно учесть влияние на сток не только факторов подстилающей поверхности, но и гидрометеорологических характеристик \dot{X} и T , °С, (обычно такие зависимости строятся для коэффициента годового стока $k_{\text{год}}$, например широко известные формулы академика М.И. Будыко). Таким образом, логичнее стохастическую модель формирования минимального стока представить следующим образом [11]:

$$dQ_{\min} = \left[-(\bar{c}_{Q_{\text{год}}} + \tilde{c}_{Q_{\text{год}}})(Q_{\min} + E_{\min}) + \bar{N}_{Q_{\text{год}}} + \tilde{N}_{Q_{\text{год}}} \right] dt, \quad (3)$$

$$dE_{\min} = \left[-(\bar{c}_{E_{\text{год}}} + \tilde{c}_{E_{\text{год}}})(Q_{\min} + E_{\min}) + \bar{N}_{E_{\text{год}}} + \tilde{N}_{E_{\text{год}}} \right] dt, \quad (4)$$

$$dQ_{\min} = \left[-(\bar{c}_{Q_{\min}} + \tilde{c}_{Q_{\min}})Q_{\min} + \bar{N}_{Q_{\min}} + \tilde{N}_{Q_{\min}} \right] dt, \quad (5)$$

где (при $\tau \approx 1$) $\bar{c}_{Q_{\min}} \sim \bar{Q}_{\text{год}} / \bar{Q}_{\min}$; $\bar{N}_{Q_{\min}} \sim \bar{Q}_{\text{год}}$; E – испарение; $\bar{N}_{Q_{\text{год}}} \sim \bar{X}_{\text{год}}$; $\bar{N}_{E_{\text{год}}} \sim \bar{X}_{\text{год}}$ (влияние изменения запасов воды в почво-грунтах учтено коэффициентами $c_{Q_{\text{год}}}$, $c_{E_{\text{год}}}$, $c_{Q_{\min}}$, то есть в конечном итоге, интенсивностью белых шумов $G_{\bar{c}_{Q_{\text{год}}}}$, $G_{\bar{c}_{E_{\text{год}}}}$, $G_{\bar{c}_{Q_{\min}}}$).

Переходя от (3)–(5) к многомерному уравнению ФПК, получаем возможность находить динамику трехмерного распределения $p(Q_{\text{год}}, E_{\text{год}}, Q_{\min}; t)$. Однако ситуацию можно упростить, отделив «годовую задачу» (3), (4) от «минимальной» (5), так как первые два уравнения не зависят от третьего. Сначала решается система (3), (4) (точнее – уравнение ФПК, полученное на их основе), а затем по условной годовой норме $\bar{Q}_{\text{год}}$, найденной из $p(Q_{\text{год}}, E_{\text{год}})$, ищется распределение $p(Q_{\min})$ по стандартной методике, изложенной выше. Таким образом, задача свелась к умению моделировать и прогнозировать двумерное распределение $p(Q_{\text{год}}, E_{\text{год}})$.

Для того чтобы сгенерировать ряд годовых испарений можно воспользоваться методикой расчета испарения по температуре и влажности воздуха, измеренных на метеорологических станциях. Она разработана бывшим заведующим кафедрой гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ профессором А.Р. Константиновым [12]. Его методика (в отличие от чисто эмпирических зависимостей, справедливых только для тех условий, в которых они получены) претендует (достаточно обоснованно) на универсальность. К последней приводит то обстоятельство, что в основе методики лежит схема расчета испарения по градиентным данным. Анализ многочисленных вертикальных профилей позволил Константинову сделать вывод о том, что вертикальный градиент температуры в приземном слое непосредственно зависит от температуры и влажности воздуха у поверхности, измеряемых в психрометрических будках. На сегодняшний день это, видимо, единственный способ получения пусть и не совсем инструментальных, а только расчетно-инструментальных, эмпирических рядов испарения. Погрешность определения годовых испарений подобным образом конечно выше таковой для расходов, но вполне с ней соизмерима [13]. С использованием изложенной методики было сгенерировано 160 рядов годового испарения по пунктам, более или менее равномерно расположенным на ЕТР, и по ГИС-технологиям с использованием компьютерных приложений *ArcView* и *Surfer* построены карты нормы слоев испарения и коэффициентов вариации (интерполяция была произведена методом Крикинга с эффектом сглаживания изолиний) (рис. 2).

Карта распределения коэффициента вариации (рис. 2, б) аналогов не имеет и отражает известный в гидрометеорологии факт, что с увеличением нормы случайной величины ее коэффициент вариации уменьшается. Эти карты, наряду с аналогичными картами для стока, позволяют строить нормальные и асимметричные (при заданном соотношении C_s/C_v) двумерные распределения $p(Q_{\text{год}}, E_{\text{год}})$ (подробности с цифровыми примерами см. [11]) и находить условные распределения $p(Q_{\text{год}}, E_{\text{год}})$ для учета внешнего воздействия заданной

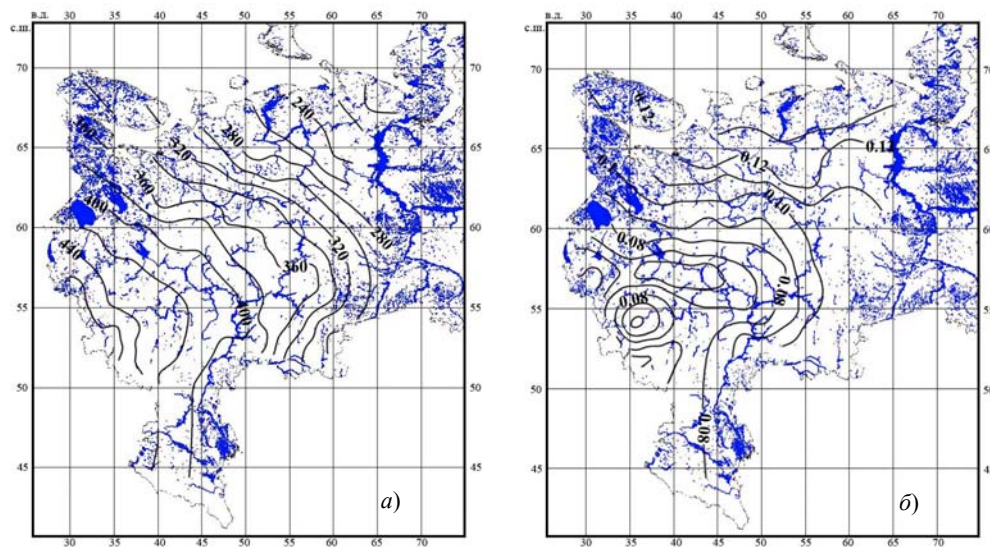


Рис. 2. Распределение по ЕТР статистических характеристик годового испарения (*а* – норма; *б* – коэффициент вариации)

обеспеченности при нахождении вероятностного распределения того или иного вида минимального стока.

Фактический ряд Q_{\min} используется при параметризации модели ФПК для $p(Q_{\min}; t)$, то есть для нахождения интенсивности шумов $G_{\tilde{c}_{Q_{\min}}}$, $G_{\tilde{N}_{Q_{\min}}}$, $G_{\tilde{c}_{Q_{\min}} \tilde{N}_{Q_{\min}}}$. Теоретическое решение уравнения ФПК (в стационарном случае – уравнения Пирсона) для $p(Q_{\min})$ позволяет аппроксимировать эмпирическое распределение ряда Q_{\min} , причем совсем не обязательно с выполнением условия $p(Q_{\min} = 0) = 0$ как того требуют кривые Крицкого – Менкеля, не «разрешающие» рекам замерзать и пересыхать, что является для «них» обычным делом. Это вовсе не означает появления в реальности «отрицательных расходов», но появление нулевых расходов реализуется с ненулевой вероятностью.

Переход от модели, основанной на стохастическом обобщении уравнения (1), к многомерному уравнению ФПК для системы (3)–(5) или к одномерному для (5) позволяет устранить по крайней мере те две проблемы, которые обусловили появление настоящей статьи.

Во-первых, применение коэффициента минимального стока в виде $k'_{\min} = \bar{Q}_{\min} / \bar{Q}_{\text{год}}$ при неизменном коэффициенте автокорреляции r , используемых в формуле для критерия устойчивости $\beta = G_{\tilde{c}} / \bar{c} = 2k \ln r + 2$ [11], приводит к существенному снижению площади регионов, являющихся неустойчивыми по моментам (рис. 1, *б*). Это происходит из-за того, что $k'_{\min} > k_{\min}$ (при средних значениях коэффициента годового стока, равных 0.5, величина $k'_{\min} / k_{\min} = 2$, что существенно повышает отрицательную составляющую в выражении для критерия β и приводит к его уменьшению).

Во-вторых, появление в модели минимального стока, основанной на системе (3)–(5), коэффициента годового стока (в выражении для $\bar{c}_{Q_{\text{год}}}$) позволяет

использовать огромный эмпирический материал по влиянию на него всевозможных антропогенных и климатических факторов, а значит, оценивать чувствительность статистических характеристик минимального стока к этим факторам.

Выводы

Предложена расширенная стохастическая модель формирования многолетнего минимального стока, включающая, наряду с последним, годовые сток и испарение. В нее вместо фиктивного коэффициента минимального стока (как это было в предшествующем варианте модели) входит, хотя так же условный, но более адекватно отражающий процесс формирования стока коэффициент. Это сделало расширенную модель статистически более устойчивой (по начальным моментам) на значительной части ЕТР.

Включение в расширенную модель формирования минимального стока широко распространенного в практической гидрологии коэффициента годового стока открыло возможность использования существующего эмпирического материала по влиянию на этот коэффициент как гидрометеорологических факторов, так и факторов подстилающей поверхности. Это позволяет при оценке долгосрочных изменений характеристик минимального стока учитывать не только климатические сценарии, но и сценарии социального развития территорий речных бассейнов, связанные как с их хозяйственным освоением, так и с демографической политикой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства высшего образования и науки РФ (проект № 2.1.1/3355).

Summary

V.V. Kovalenko, E.V. Gaidukova, N.V. Victorova, M.N. Gromova, L.I. Lesnichii. Evaluation Method for Long-term Changes of Probabilistic Characteristics of the Minimal Flow at Anthropogenic Climatic Change.

The article views the modernization of a known evaluation method for long-term changes of the minimal flow based on using a stochastic model in the form of a linear forming filter. In order to increase the decisions' statistical stability and for the model to be able to regard not only hydrometeorological factors of flow formation, but also the spreading surface factors, the phase space in which the decision is searched for has been expanded. Annual flow and evaporation are involved as additional phase variables.

Key words: minimal flow, stochastic model, instability, expansion of phase space, evaporation.

Литература

1. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2004. – 74 с.
2. Коваленко В.В. Моделирование гидрологических процессов. – СПб: Изд-во РГГМУ, 1993. – 256 с.
3. СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1985. – 36 с.

4. *Викторова Н.В.* Исследование применимости стохастической модели формирования летне-осеннего и зимнего минимального стока для оценки гидрологических последствий антропогенного изменения климата: Дис. ... канд. тех. наук. – СПб.: РГГМУ, 2002. – 240 с.
5. *Гайдукова Е.В.* Чувствительность критериев оптимальной плотности режимной гидрологической сети к климатическим изменениям (на примере минимального стока бассейна р. Оби): Дис. ... канд. тех. наук. – СПб.: РГГМУ, 2004. – 131 с.
6. *Громова М.Н.* Методика оценки статистических характеристик группировок минимального стока: Дис. ... канд. тех. наук. – СПб.: РГГМУ, 2008. – 168 с.
7. *Владимиров А.М.* Минимальный сток рек СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 214 с.
8. *Коваленко В.В., Хаустов В.А.* Критерии устойчивого развития гидрологических процессов и картирование зон ожидаемых аномалий параметров годового стока рек СНГ при антропогенном изменении климата // *Метеорология и гидрология.* – 1998. – № 12. – С. 96–102.
9. *Пространственно-временные колебания стока рек СССР / Под ред. А.В. Рождественского.* – Л.: Гидрометеиздат, 1998. – 376 с.
10. *Устюжанин Б.С.* Реакция речного стока на урбанизацию водосбора // *Расчеты и прогнозы гидрологических характеристик / Труды ЛГМИ. Вып. 103.* – Л.: Изд-во ЛПИ, 1989. – С. 73–81.
11. *Коваленко В.В.* Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2009. – 101 с.
12. *Константинов А.Р.* Испарение в природе. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 532 с.
13. *Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Соловьев Ф.Л.* Идентификация статистических характеристик годового испарения на ЕТР для формирования диагностических моделей в задачах частично инфинитной гидрологии // *Естественные и технические науки.* – М.: Компания Спутник+, 2009. – № 2. – С. 200–208.

Поступила в редакцию
02.07.09

Коваленко Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидрофизики и гидропрогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург.

Гайдукова Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры гидрофизики и гидропрогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург.

E-mail: oderiut@mail.ru

Викторова Наталья Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры гидрофизики и гидропрогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург.

E-mail: nata_vic@mail.ru

Громова Марина Николаевна – кандидат технических наук, инженер кафедры гидрофизики и гидропрогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург.

E-mail: marusha1981@mail.ru

Лесничий Леонид Игоревич – аспирант кафедры гидрофизики и гидропрогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург.

E-mail: leon777@mail.ru