



УДК 556.5.06

DOI 10.18413/2075-4671-2018-42-4-540-549

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНОГО СТОКА РЕК В РАЗЛИЧНЫХ ЛАНДШАФТНЫХ УСЛОВИЯХ РАВНИННОЙ ЧАСТИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ**MODELING OF RIVER RUN-OFF IN THE DIFFERENT LANDSCAPE CONDITIONS ON PLAIN PART OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA****Е.А. Веденева****E.A. Vedeneva**

Казанский (Приволжский) Федеральный университет,
Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 1

Kazan Federal University,
18 Kremlevskaya St, Kazan, 420008, Russia

E-mail: vedeneva-evgeniya@mail.ru

Аннотация

В статье описывается задача моделирования модуля водного стока рек в различных ландшафтных условиях в пределах равнинной части Европейской территории России с помощью методов общей линейной модели и общей аддитивной модели, реализуемых в статистической среде R. Построенные модели отличаются удовлетворительным качеством, хорошо интерпретируются и отражают условия формирования стока в каждой из рассматриваемых зон. Наилучшая модель была получена для степной зоны.

Abstract

The paper reveals the mathematical modeling of river run-off modulus in the different landscape conditions on plain part of the European part of Russia. It describes the application of methods such as the generalized linear model (GLM) and the generalized additive model (GAM) to establishing of quantitative links between the river run-off modulus and the totality of its controlling factors. Regression models are successfully used for study river run-off on the local regional and global scale. The object of the research covers the river run-off in the small river basins. Geoinformation base «River basins of the European part of Russia» was used as input data. The construction of models was preceded by an analysis of the structure of explanatory variables, as well as the study of their mutual correlation. Calculations were carried out using programs written in the statistical environment R. In the end of the study, the author gives results of modeling river run-off. Nonlinear methods of modeling give better results compared to linear methods. The constructed models explain about 45-70 % of the variability of the data and well reflect conditions of river run-off formation. The best model was obtained for the steppe zone.

Ключевые слова: водный сток рек, геоинформационная база, ландшафтные зоны, моделирование, множественная регрессия.

Keywords: river run-off, geoinformation base, landscape zone, modeling, multiple regression.

Введение

Водный сток рек представляет собой сложный многофакторный процесс. Установление количественных связей между характеристиками стока и совокупностью определяющих его факторов является, несомненно, актуальной задачей в условиях неравномерного размещения гидрологических постов и станций, а также наблюдающейся тенденции уменьшения их количества. Получение данных о водном стоке рек с гидрологически неизученных бассейнов возможно с помощью моделирования,

выполненного на основе современных данных как о факторах формирования стока, так и о самом стоке.

Одним из наиболее часто используемых методов моделирования водного стока является множественная регрессия. Применение этого простого и эффективного метода сопряжено с соблюдением ряда принципиальных требований, предъявляемых с исходным данным: близость законов распределения выборок к нормальному и отсутствие или незначительная связь между независимыми переменными [Шелутко, Долинная, 2015]. Стоит отметить, что множественная регрессия часто применяется в составе других методов моделирования водного стока, в частности, служит для оценки модельных параметров путем поиска связей между ними и характеристиками водосборов [Oudin et al., 2008; Gibbs et al., 2012], а также используется для отбора наиболее значимых факторов [Гордеева, Малинин, 2018]. Применение данного метода для исследования условий формирования водного стока с успехом проводится на различных уровнях: от локального, охватывающего отдельные водосборы, до регионального и глобального [Duan Limin et al., 2010; Barbarossa et al., 2017; Zengin, 2017].

В качестве исходных данных для построения регрессионных моделей могут выступать различные природные и антропогенные факторы (предикторы) формирования водного стока. Так, для моделирования стока на отдельных водосборах часто используют только климатические факторы, например, количество атмосферных осадков, причем такие важные факторы, как рельеф и тип земного покрова игнорируются намеренно [Patel et al., 2016], что связано с необходимостью простого и быстрого определения величины стока. Связи между стоком и климатическими факторами могут изучаться в разных временных масштабах. Такое приложение множественной регрессии направлено на исследование отклика водного стока рек на изменения климата [Chong-Li et al., 2014].

Ряд работ посвящен оценке влияния на сток одного фактора. В исследовании [Živković et al., 2015] описывается влияние различных типов растительности (лесов, лугов и пахотных угодий) на водный сток рек. Также в качестве факторов могут быть использованы такие показатели как процент залесенности территории и вегетационные индексы (EVI, NDVI и NDWI) [Ning et al., 2017]. Предиктором может выступать и так называемый ландшафтный фактор, представляющий доли площадей, занимаемых различными ландшафтами, от площади всего водосбора [Терский и др., 2017]. В данном случае ландшафтный фактор выступает в качестве интегрального фактора, объединяющего геологическое строение территории, рельеф и почвенно-растительные условия. Успешное применение множественной регрессии возможно при использовании таких показателей как форма водосбора и характеристики рельефа [Zengin et al., 2017].

Наряду с моделированием водного стока в отдельных водосборах, использование множественной регрессии позволяет получать адекватные модели формирования стока на региональном уровне. В качестве предикторов выступают данные как о климатических показателях, так и о характеристиках подстилающей поверхности [Reimers, 1990; Vogel et al., 1999; Tran et al., 2015]. Актуальность подобных исследований связана с недостаточной гидрологической изученностью территории вследствие низкой обеспеченности гидрологическими постами и станциями. Авторы отмечают, что результаты регионального моделирования стока могут быть успешно внедрены в геоинформационные базы данных.

С развитием и внедрением геоинформационных систем (ГИС) совместно с доступностью цифровых данных получение различных показателей, представляющих факторы формирования стока, становится намного эффективнее и позволяет моделировать сток с более высокой точностью [Zhu et al., 2009].

Установление взаимосвязей стока с различными характеристиками водосборов с применением регрессионных моделей возможно и на глобальном уровне. В исследовании [Burgers et al., 2014] представлены модели формирования стока, где в качестве независимых переменных были использованы площадь водосбора, длина водотока, а



также годовое количество осадков. Авторы отмечают, что включение в модель количества осадков позволило улучшить ее качество с 40 до 56 % объясненной изменчивости данных. Успешная реализация метода множественной регрессии продемонстрирована в работе [Barbarossa et al., 2017] при построении глобальной модели стока, позволяющей рассчитать его характеристики в любой точке речной сети в глобальном масштабе. В рамках данного исследования помимо построения самой модели было проведено ее сравнение с существующей гидрологической моделью PCR-GLOBWB. Анализ результатов сравнения показал, что построенная регрессионная модель с меньшим значением среднеквадратического отклонения, имеет более высокое качество прогнозирования водного стока.

Объект и методы исследования

Целью данного исследования является построение моделей формирования стока с помощью множественной регрессии для различных ландшафтных зон равнинной части Европейской территории России, каждая из которых, в свою очередь, характеризуется своеобразными условиями формирования стока.

В качестве исходных материалов выступила информация как о водном стоке рек, так и о факторах его формирования, накопленная в геоинформационной базе данных «Речные бассейны Европейской территории России». Обобщение информации было осуществлено на поверхностные водосборы рек, отнесенные к гидрологическим постам, выделенные в автоматическом режиме средствами ГИС-технологий по цифровой модели рельефа GMTED2010 с разрешением 250 м [Ermolaev et al., 2017].

Данные наблюдений за водным стоком были получены из различных источников: опубликованные материалы долгосрочных режимных наблюдений на гидрологических постах [Ресурсы..., 1973], данные открытых источников (<http://caspi.ru/>, Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов Федерального агентства водных ресурсов), данные ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Для большинства гидропостов информация о водном стоке была актуализирована до 2015 г. Источником данных о климатических факторах послужили данные метеостанций Росгидромета за период с 1964 г. по 2014 г. (открытые данные ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»). Источником данных о характеристиках почвенного покрова: единый государственный реестр почвенных ресурсов России. В качестве источника информации о рельефе исследуемой территории выступила модель рельефа GMTED2010 с пространственным разрешением 250 м. Карта типов земного покрова, разработанная в Институте космических исследований Земли (www.iki-z.ru) (Москва–2015), послужила источником информации о типах земного покрова и степени антропогенной нарушенности. Учет геологических условий проводился с использованием Государственной геологической карты дочетвертичных отложений масштаба 1:1 000 000.

На основе данных о типе ландшафта, включенных в геоинформационную базу «Речные бассейны Европейской части России» был проведен дисперсионный анализ, выявляющий наличие или отсутствие влияния фактора на зависимую переменную, в данном случае, на модуль водного стока рек. Проведенный анализ показал, что исследуемый категориальный фактор оказывает влияние на модуль водного стока, иными словами, дисперсионный анализ не опровергает гипотезу о влиянии типа ландшафта на модуль водного стока. Полученный результат послужил обоснованием для проведения моделирования водного стока в отдельных ландшафтных зонах.

Ландшафтные зоны равнинной части исследуемой территории характеризуются различной степенью обеспеченности гидрологическими наблюдениями. Плотность размещения гидропостов варьирует от 3 до 6 на 10 000 км², принимая минимальные значения в северных малообжитых районах. Наибольшей плотностью постов характеризуются лесостепная зона и зона широколиственных лесов (5–6 постов на

10 000 км²). Распределение гидропостов по продолжительности наблюдений имеет сходный характер для различных ландшафтных зон. Так, в зоне лесотундры, тайги, зоне широколиственных лесов, лесостепной и степной зонах большая часть гидропостов имеет период наблюдений от 11 до 40 лет. Проценты от общего числа таких гидропостов в каждой зоне варьируют от 38.3 в лесотундре до 65.9 в степной зоне. Количество гидропостов с рядами наблюдений более 40 лет для лесотундры составляет 11 %, тайги – 32.8 %, широколиственных лесов – 40.3 %, лесостепи – 58 %, степи – 33 %. К наиболее изученным относятся участки рек, приуроченные к гидропостам, с площадями водосборов от 1 000 до 5 000 км², что характерно для перечисленных выше ландшафтных зон.

Общее количество гидропостов, приуроченных к равнинной части ЕТР, составляет 1440. Для проведения регрессионного анализа были отобраны только те водосборы, площадь которых не превышает 50 000 км² с числом наблюдений на гидропосту не менее 10 лет. Для моделирования водного стока в различных ландшафтных зонах были сформированы четыре подвыборки водосборов гидропостов, расположенных в таежной зоне (721 водосбор), в зоне широколиственных лесов (108 водосборов), в лесостепной (136 водосборов) и степной (144 водосборов) зонах. Моделирование водного стока в водосборах, относящихся к зонам тундры и лесотундры, а также полупустыни проблематично по причине небольшого объема соответствующих выборок.

Каждая из представленных подвыборок включает в качестве независимых переменных несколько групп факторов, а именно: климатические факторы, морфометрические показатели рельефа в речном бассейне, типы земного покрова, а также тип почв, тип почвообразующих пород и класс дочетвертичных отложений. Зависимой переменной выступил модуль водного стока рек.

Построению моделей предшествовал статистический анализ выборочных данных, который показал, что распределение некоторых переменных не показывает согласия с нормальным распределением (модуль водного стока, морфометрические характеристики рельефа в бассейне, среднее годовое количество осадков и количество осадков за теплый период года и другие). Дальнейшее использование таких данных для моделирования водного стока возможно после их логарифмического преобразования. Помимо одномерного анализа, был проведен анализ взаимной скоррелированности независимых переменных, а также анализ коэффициента возрастания дисперсии (VIF) с целью определения наилучшего подмножества предикторов, линейно независимых относительно друг друга. На следующем этапе подготовки выборочных данных была проведена стандартизация (нормирование) количественных предикторных переменных с целью сравнения предикторных переменных между собой и выявления абсолютного вклада каждой переменной в модель.

Моделирование зависимости модуля водного стока от условий его формирования проводилось по данным выборок с использованием таких методов, как обобщенная линейная модель (GLM) и обобщенная аддитивная модель (GAM). Расчеты проводились с помощью программ, написанных в статистической среде R (r-project.org). Особенностью GAM является оценка для каждого предиктора функции неопределенного вида с использованием сплайнов. Из-за большого числа коэффициентов таких функций, уравнение регрессии в явном виде не выписывается. Описание модели проводится посредством графического представления частных зависимостей, описываемых функциями, для каждого из значимых предикторов [Hastie, Tibshirani, 1990]. Стоит отметить, что на графиках частных зависимостей представлены стандартизованные значения независимых переменных.

Результаты и их обсуждение

По результатам моделирования водного стока в таежной зоне в модель вошли следующие факторы: сумма активных температур воздуха в градусах (отрицательный

вклад), годовое количество осадков и процент лесистости водосборов (положительный вклад). Наибольший вклад в модель вносит сумма активных температур воздуха (рис. 1а). Качество построенной модели характеризуется процентом изменчивости данных, который объясняется моделью. Для модели формирования стока в таежной зоне этот параметр составляет 45 %. На рис. 1б представлена диаграмма рассеяния, на которой наблюдаемые значения логарифма модуля водного стока (observed) отображены против модельных значений (predicted).

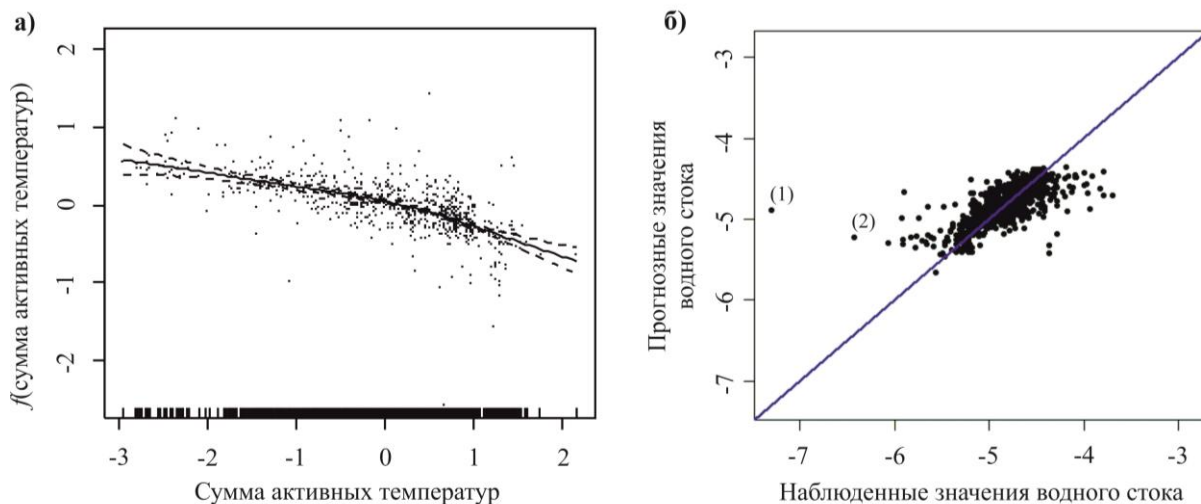


Рис. 1. График частной зависимости модуля водного стока от суммы активных температур воздуха (а) и диаграмма рассеяния для модели формирования стока таежной в зоне (б)

Fig. 1. The partial dependence plot of river run-off modulus on the sum of active temperatures (a) and the scatterplot of river run-off formation in the boreal forest zone (b)

Набор значимых предикторов и характер их связи с зависимой переменной хорошо интерпретируются и отражают условия формирования стока рассматриваемой зоне. Высокая лесистость водосборов способствует улучшению условий инфильтрации влаги и пополнения запасов грунтовых вод, питающих реки в меженный период. Вхождение в модель годового количества осадков объясняется небольшими потерями летних осадков на испарение вследствие невысоких температур воздуха по сравнению с более южными зонами, где значимую роль в формировании стока играют осадки за холодный период года. Сумма активных температур характеризует период наибольшей испаряющей способности климата, чем объясняется отрицательный вклад данного фактора в модель. Стоит отметить, что в условиях низменного и слаборасчлененного рельефа таежной зоны факторы рельефа значимой роли в формировании стока не играют. Для данных показателей (средняя крутизна склонов, длины линий тока, средняя высота водосбора) были получены низкие значения коэффициентов корреляции с зависимой переменной (порядка 0.1–0.2).

На диаграмме рассеяния полученной модели выделяются два гидропоста (р. Волга – д. Большая Волга (1) и р. Унжа – д. Верхоунжа (2)). Наблюдаемые значения модуля стока для данных гидропостов значительно превышают моделью: в 9 раз для гидропоста (1) и в 2 раза для гидропоста (2). Более низкий сток, наблюдаемый на обоих гидропостах, по сравнению с моделируемым, связан с неблагоприятными условиями формирования стока, а именно распространением песчаных почво-грунтов.

Формирование водного стока в зоне широколиственных лесов по результатам моделирования зависит от следующих факторов: лесистость бассейна, длины линий тока и крутизна склонов в бассейне. Стоит отметить, что связь между модулем водного стока и длинами линий тока имеет отрицательный характер, с лесистостью бассейна и крутизной склонов – положительный. Полученная нелинейными методами модель объясняет 45 % изменчивости данных. Наиболее значимым фактором является лесистость бассейна. На

рис. 2 представлены график частной зависимости логарифма модуля водного стока от лесистости бассейна, а также диаграмма рассеяния для модели, полученной методом GAM.

Отличительной особенностью данной модели является отсутствие в качестве значимых факторов климатических показателей. Увеличение длин линий тока в условиях равнинного рельефа влечет увеличение потерь влаги на испарение, на их перевод в подземный сток и на потери объемов стока за счет западин в рельефе, возникающих на длинных, уплощенных склонах. Крутизна склонов, в свою очередь, уменьшает время стекания воды, тем самым снижая потери на испарение.

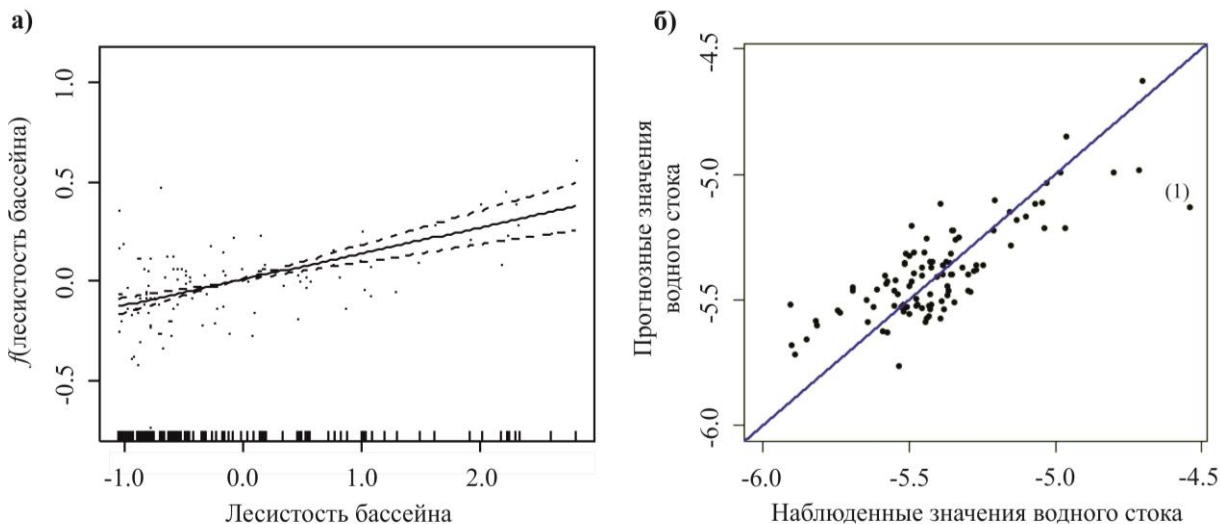


Рис. 2. График частной зависимости модуля водного стока от лесистости бассейнов (а) и диаграмма рассеяния для модели формирования стока в зоне широколиственных лесов (б)

Fig. 2. The partial dependence plot of river run-off modulus on the forest cover percent (a) and the scatterplot of river run-off formation in the broad-leaved forest zone (b)

На диаграмме рассеяния (рис. 2б) выделяется гидропост (р. Бирь – с. Малосухоязово), наблюдаемый сток, на котором выше моделируемого в 0.8 раза. Это связано с влиянием карста, а именно с интенсивным дренированием рекой подземных вод, формирующихся в карстовых областях [Ресурсы..., 1973].

Моделирование водного стока в лесостепной зоне показало следующие результаты. Модель, полученная с помощью нелинейных методов (GAM), объясняет порядка 58 % изменчивости данных. Значимыми факторами формирования стока в данной ландшафтной зоне являются сумма активных температур воздуха, средняя крутизна склонов и годовое количество осадков. Наибольший вклад в модель вносит сумма активных температур. На рис. 3 представлены график частной зависимости логарифма модуля водного стока от суммы активных температур воздуха, а также диаграмма рассеяния для модели, полученной методом GAM.

Полученные связи модуля водного стока с представленными факторами хорошо интерпретируются. Отрицательное влияние суммы активных температур воздуха отражает расход влаги на испарение, в том числе расход на транспирацию травянистой и древесной растительностью. Положительная связь модуля стока со средней крутизной склонов объясняется уменьшением расходов на испарение при увеличении скорости движения воды по склону. Кроме того, с увеличением крутизны склонов уменьшается количество западин, аккумулирующих сток и безвозвратно расходующих его на испарение. Большое количество прудов, образованных на реках данной зоны, задерживает и впоследствии расходует на испарение талый сток, что приводит к снижению его роли в формировании стока. Этим объясняется включение в модель в качестве значимого фактора среднего годового количества осадков.

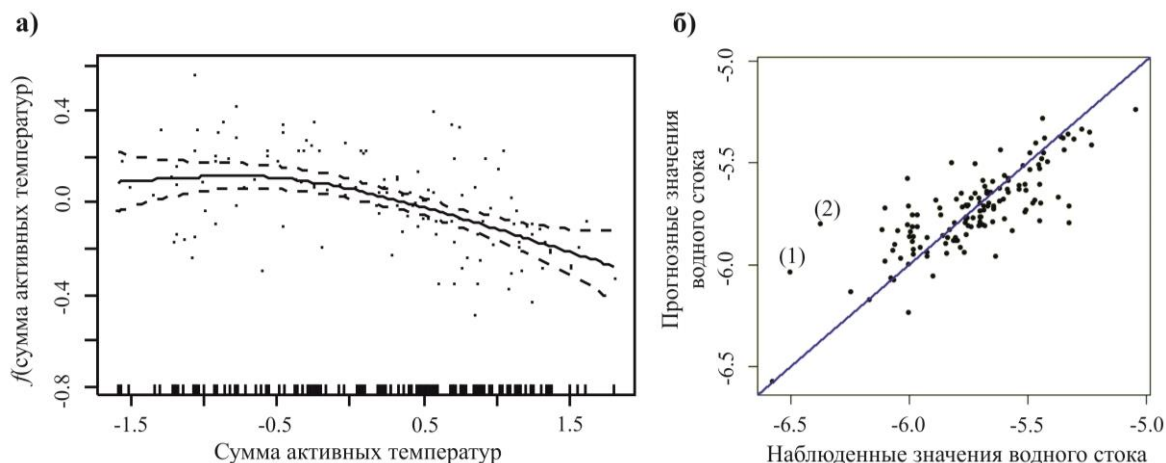


Рис.

3. График частной зависимости модуля водного стока от суммы активных температур воздуха (а) и диаграмма рассеяния для модели формирования стока в лесостепной зоне (б)
 Fig. 3. The partial dependence plot of river run-off modulus on the sum of active temperatures (a) and the scatterplot of river run-off formation in the forest-steppe zone (b)

На диаграмме рассеяния (см. рис. 3б) цифрами (1) и (2) отмечены гидропосты, наблюдаемый сток на которых ниже, чем смоделированный в 0.7 раз и 1.3 раза соответственно. Для гидропоста р. Бирля – с. Вишенка (1) это связано, во-первых, с высокой зарегулированностью реки и последующим расходом стока на безвозвратное испарение, во-вторых, с ухудшением условий инфильтрации стока и пополнения запасов грунтовых вод вследствие высокой распаханности бассейна. Завышение стока на гидропосту р. Урляда – д. Новоахуново (2) связано с пониженным количеством осадков по сравнению с другими водосборами.

По результатам моделирования водного стока в степной зоне наиболее значимыми факторами являются сумма активных температур воздуха, количество осадков за холодный период года и средняя крутизна склонов в водосборе. Следует отметить, что использование нелинейных методов моделирования показало лучшие результаты по сравнению с линейными. Так, модель, полученная с помощью метода GAM, объясняет порядка 78 % изменчивости данных. Наибольший вклад в модель вносит сумма активных температур воздуха. На рис. 4 представлены график частной зависимости логарифма модуля водного стока от суммы активных температур воздуха, а также диаграмма рассеяния для модели, полученной методом GAM.

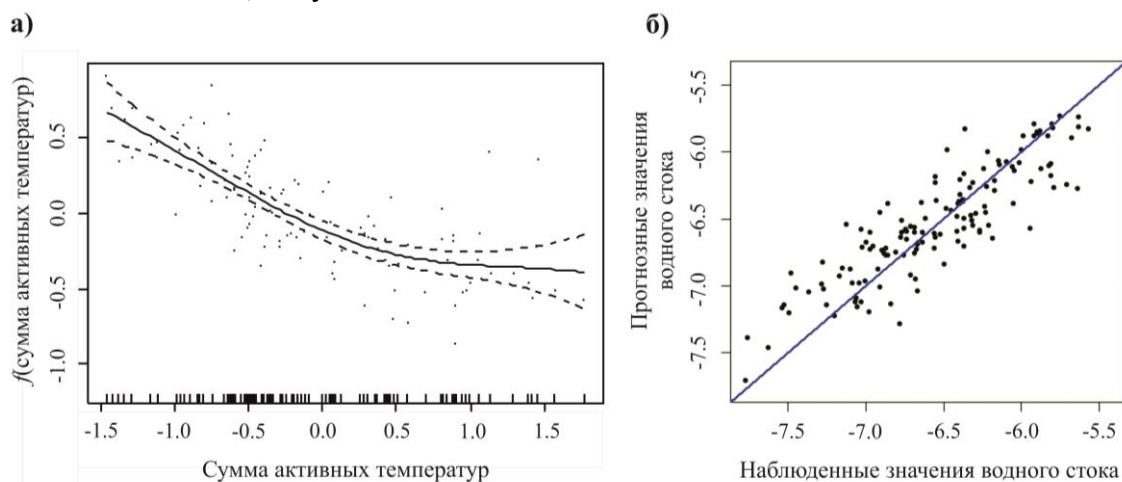


Рис. 4. График частной зависимости модуля водного стока от суммы активных температур воздуха (а) и диаграмма рассеяния для модели формирования стока в степной зоне (б)
 Fig. 4. The partial dependence plot of river run-off modulus on the sum of active temperatures (a) and the scatterplot of river run-off formation in the steppe zone (b)

Интерпретация полученных зависимостей следующая. Положительное влияние средней крутизны склона на модуль стока связан с увеличением скорости стекания воды и уменьшением потерь на испарение. Включение в модель с положительным знаком количества осадков за холодный период можно объяснить со следующих позиций. Почвы в зоне степей ввиду повышения зимних температур и учащения оттепелей меньше промерзают, что ведет к водонасыщению почв и грунтов талым стоком с последующим его переводом в подземный сток и разгрузкой в водотоки [Джамалов и др., 2012; Алексеевский и др., 2013]. Осадки, выпадающие за теплый период года, в основном расходуются на испарение и значимой роли в формировании стока не играют. Отрицательное влияние на модуль стока суммы активных температур воздуха связано, с одной стороны, с увеличением испарения, что обусловлено увеличением температур воздуха, с другой стороны, со значительным увеличением транспирации естественной травянистой растительностью агроценозами при высокой распашке территории степей.

Заключение

Построение моделей формирования стока в пределах различных ландшафтных зон равнинной части Европейской части России с помощью множественной регрессии показало достаточно удовлетворительные результаты. Наборы значимых факторов, представленные в каждой модели, отражают условия формирования стока, полученные направления связи с зависимой переменной – модулем водного стока – хорошо интерпретируются. Наибольший вклад в модель стока для таежной зоны, лесостепной и степной зон вносит сумма активных температур воздуха, характеризующая потери стока на испарение. В формирование водного стока зоны широколиственных лесов наибольший вклад вносит лесистость водосбора. Построенные модели также отражают зональный характер распределения факторов формирования стока. Так, с севера на юг уменьшается влияние лесистости водосбора на сток. В то же время происходит увеличение влияния количества осадков за холодный период года. Стоит отметить, что значимость факторов рельефа также изменяется в зависимости от зоны. Расчлененный рельеф степной и лесостепной зоны вносит существенный вклад в формирование стока через увеличение крутизны склонов, тогда как низменный рельеф тайги значимого влияния на сток не оказывает. По диаграммам рассеяния были выделены гидропосты, наблюдаемые величины стока на которых существенно отличаются от смоделированных как в сторону занижения, так и в сторону завышения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (15–17–10008).

Список литературы

References

1. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игонина М.И. 2013. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги. Вода: химия и экология, 4: 3–12.
Alekseevskij N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I. 2013. Assessment of climate change impacts on water regime and river run-off in the Volga river basin. Water: chemistry and ecology, 4: 3–12. (in Russian)
2. Гордеева С.М., Малинин В.Н. 2018. О предвычислении годового стока крупных рек Европейской части России на основе метода деревьев решений (decision trees). Ученые записки РГГМУ, 50: 53–65.
Gordeeva S.M., Malinin V.N. 2018. On predicting annual runoff of large rivers of European Russia based on decision trees method. Scientific notes of Russian State Hydrometeorological University, 50: 53–65. (in Russian)



3. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Кричевец Г.Н., Сафронова Т.И., Киреева М.Б., Игонина М. И. 2012. Формирование современных ресурсов поверхностных и подземных вод европейской части России. *Водные ресурсы и режим водных объектов*, 39 (6): 571–589.
Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Krichevec G.N., Safronova T.I., Kireeva M.B., Igonina M. I. 2012. Formation of surface and groundwater modern resources of the European part of Russia. *Water resources and water bodies regime*, 39 (6): 571–589 (in Russian)
4. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 11 / Под редакцией ст. науч. сотр. ГГИ, к.г.н Н.М. Алюшинской. Л., Гидрометеиздат, 1973.
Resources of surface waters of the USSR. Т. 11 / Edited by senior research officer of State Hydrological Institute, candidate of geographic sciences N.M. Alyushkinskaya. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1973. (in Russian)
5. Терский П.Н., Жбаков К.К., Михеева А.И. 2017. Связь морфометрических характеристик водосборов и ландшафтных условий в бассейне р. Авачи (Камчатка) с характеристиками среднегодового и максимального стока рек. Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части тихоого океана, 46: 51–65.
Terskiy P.N., Zhbakov K.K., Miheeva A.I. 2017. The correlation between morphometric characteristics, landscape drivers of flow generation and the characteristics of maximum and mean annual river flow in the Avacha river catchment (Kamchatka). The researches of the aquatic biological resources of Kamchatka and of the north-west part of the Pacific Ocean, 46: 51–65. (in Russian)
6. Шелутко В.А., Долинная С.Я. 2015. Вопросы линеаризации связей и нормализации исходных рядов при расчетах по уравнениям регрессии. *Ученые записки РГГУ*, 38: 230–239.
Shelutko V.A., Dolinnaya S.Ya. 2015. Questions on the use of linearization and normalization methods of original series in regression equations' calculating. *Scientific notes of Russian State Hydrometeorological University*, 38: 230–239. (in Russian)
7. Barbarossa V., Huijbregts M., Hendriks A.J., Beusen A., Clavreul J., King H., Schipper A. M. 2017. Developing and testing a global-scale regression model to quantify mean annual streamflow. *Journal of Hydrology*, 544: 479–487.
8. Burgers (R.) H.E., Schipper A.M., Hendriks A.J. 2014. Size relationships of water discharge with catchment area, main-stem length and precipitation. *Hydrological processes*, 28: 5769–5775.
9. Chong-Li Di, Xiao-Hua Yang, Xing-Hui Xia, Xiao-Juan Chen, Jian-Qiang Li. 2014. Multi-scale modeling of the response of runoff to climate change. *Thermal science*, 18 (5): 1511–1516.
10. Duan Limin, Liu Tingxi, Wang Xixi, Luo Yanyun, Wu Long. 2010. Development of a regional regression model for estimating annual runoff in the Hailar river basin of China. *Journal of Water Resource and Protection*, 2 (11): 934–943.
11. Ermolaev O.P., Maltsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneeva E.A. 2017. Cartographic model of river basins of European Russia. *Geography and Natural Resources*, 38 (2): 131–138.
12. Gibbs M.S., Maier H.R., Dandy G.C. 2012. A generic framework for regression regionalization in ungauged catchments. *Environmental Modelling and Software*, 27: 1–14.
13. Hastie T.J., Tibshirani R.J. 1990. *Generalized Additive Models*. Chapman and Hall/CRC, 352.
14. Oudin L., Andréassian V., Perrin C., Michel C., Le Moine N. 2008. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: a comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44 (3): W03413–W03413.
15. Reimers W. 1990. Estimating hydrological parameters from basin characteristics for large semiarid catchments. *Regionalization in Hidrology. IAHS Publ*, 191: 187–195.
16. Patel S., Hardaha M.K., Seetpal M.K., Madankar K.K. 2016. Multiple linear regression model for stream flow estimation of Wainganga river. *American Journal of Water Science and Engineering*, 2 (1): 1–5.
17. Tran L.T., O'Neill R.V., Bruins R.J.F., Smith E.R., Harden C. 2015. Linking land use/land cover with climatic and geomorphologic factors in regional mean annual streamflow models with geospatial regression approach. *Progress in Physical Geography*, 39 (2): 258–274.
18. Vogel R.M., Wilson I., Daly C. 1999. Regional regression models of annual streamflow for the United States. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 125 (3): 148–157.

19. Zengin H., Özcan M., Değermenci A.S., Çitgez T. 2017. Effects of some watershed characteristics on water yield in the West Black Sea Region of northern Turkey. *Bosque*, 38 (3): 479–486.

20. Zhu Y., Day R.L. 2009. Regression modeling of streamflow, baseflow, and runoff using geographic information systems. *Journal of Environmental Management*, 90: 946–953.

21. Živković N., Dragičević S., Ristić R, Novković I., Djurdjić S., Luković J., Živković L., Jovanović S. 2015. Effects of vegetation on runoff in small river basins in Serbia. *Fresenius Environmental Bulletin*, 24 (6): 1511–1516.

Ссылка для цитирования статьи

Reference to article

Веденева Е.А. Моделирование водного стока рек в различных ландшафтных условиях равнинной части европейской территории России // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2018. Т. 42, №4. С. 540–549. doi: 10.18413/2075-4671-2018-42-4-540-549

Vedeneva E.A. Modeling of River Run-off in the Different Landscape Conditions on Plain Part of the European Part of Russia // *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series*. 2018. V. 42, №4. P. 540–549. doi: 10.18413/2075-4671-2018-42-4-540-549