

оценка повторяемости, результаты моделирования // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 2. С. 111–122.

5. *Gelfan A., Motovilov Y., Krylenko I., Moreido V., Zakharova E.* Testing the robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions // *Hydrol. Sci. J.* 2015. V. 60 (7, 8). P. 1266–1285.

6. *Gelfan A., Semenov V., Gusev E., Motovilov Y., Nasonova O., Krylenko I., and Kovalev E.* Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by internal atmospheric variability // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2015. V. 19. P. 2737–2754.

7. *Motovilov Y.G., Gelfan A.N.* Assessing runoff sensitivity to climate change in the Arctic basin: empirical and modelling approaches // *IAHS Publ.* 2013. V. 360. P. 105–112.

8. *Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.* Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат. – 1974. – 422 с.

9. *Taylor, K.E.* Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram // *J. Geophys. Res.* 2001. 106: 7183–7192. doi:10.1029/2000JD900719.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА В БАССЕЙНЕ р. УССУРИ НА БАЗЕ МОДЕЛИ ECOMAG¹²

*Мотовилов Ю.Г.¹, Бугаец А.Н.^{2,3}, Гарцман Б.И.^{1,2}, Гончуков Л.В.³, Калугин А.С.¹,
Луцаков С.Ю.², Морейдо В.М.¹, Сучилина З.А.^{1,4}, Фингерт Е.А.^{1,4}*

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

²Тихоокеанский институт географии ДО РАН, г. Владивосток, Россия

³Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, г. Владивосток,

⁴МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

motol49@yandex.ru

Введение. Климат региона играет определяющую роль в формировании гидрологического режима водных объектов. Поэтому качество моделирования стока с помощью распределенных гидрологических моделей в значительной степени зависит от корректности воспроизведения пространственной картины неоднородностей метеорологических воздействий на водосбор и, в первую очередь, от детальности задания полей осадков. Многочисленными исследованиями установлено, что в целом качество гидрологического моделирования ухудшается при снижении плотности осадкомерной сети (например, [1]). В России, как и во многих других странах, наблюдения за осадками выполняются на метеорологических и гидрологических станциях и постах. Причем, существует мнение, что осадкомерные наблюдения на метеостанциях более надежны по сравнению с данными измерений на гидрологических постах. Поэтому осадкомерная сеть на гидропостах зачастую не задействуется в гидрологических моделях, поскольку некачественные данные об осадках на некоторых гидропостах могут приводить к ухудшению результатов моделирования.

В качестве основы гидрологической модели для описания процессов формирования стока в работе задействована пространственно-распределенная физико-

¹² Разработка модели формирования стока выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №16-05-00864), валидация модели – при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00105).

математическая модель ECOMAG (ECOLOGical Model for Applied Geophysics) [2, 3]. Модель прошла испытания на многих речных бассейнах, в разных физико-географических зонах, в различных пространственных масштабах и доказала свою эффективность при расчете гидрографов стока с суточным разрешением и моделировании динамики гидрологических полей (влажности почвы, запасов воды в снежном покрове, стока) в крупных речных бассейнах [3, 4].

В работе акцент делается на следующих двух аспектах: (1) - исследование возможностей модели ECOMAG при моделировании пространственной картины режима стока в речных бассейнах со специфическими особенностями формирования стока в условиях муссонного климата [5]; (2) - исследование чувствительности модели к плотности задания осадкомерной сети и возможности привлечения данных осадкомеров на гидропостах для гидрологических расчетов в регионе.

Объект исследований. Исследуемая территория – верхняя часть бассейна р. Усури до п. Кировский площадью 24400 км². Длина реки от истока составляет 240 км. Бассейн реки достаточно контрастен по рельефу (рис 1).

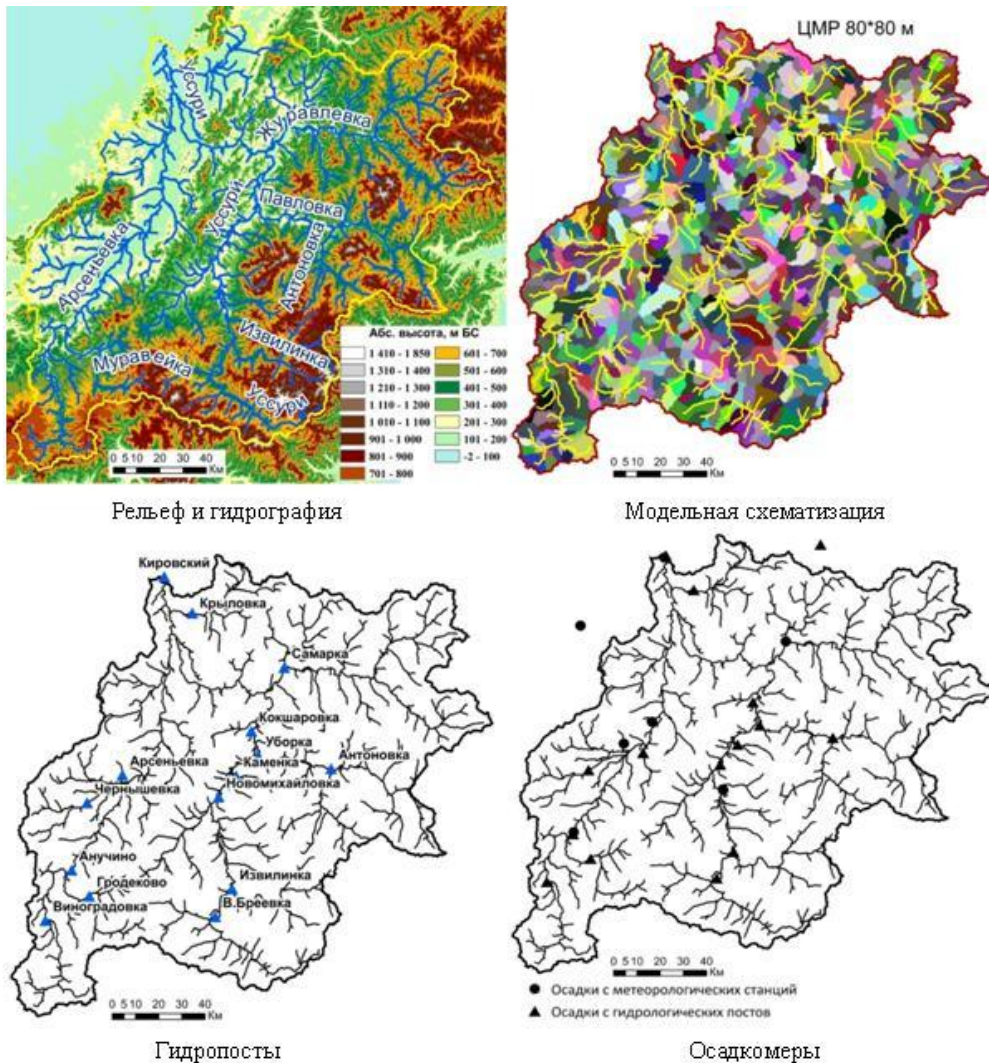


Рисунок 1. Характеристики бассейна р. Усури (до г/п Кировский)

В юго-восточной части бассейна преобладают горы, на северо-западе – низменности. Верховье Уссури и Арсеньевки находится среди гор Пржевальского с наивысшей отметкой – г. Облачная 1854 м. Уссури и ее притоки протекают по большей части в межгорных котловинах. С запада бассейн отгорожен от Приханкинской равнины Синим хребтом.

Распределение почв и растительности сильно подвержено высотной поясности. К самым высоким отметкам относятся горно-тундровые почвы и кустарничковый тип растительности. На востоке и юго-востоке бассейна к горным территориям приурочены горные буро-таежные почвы и горно-подзолистые почвы, на которых произрастают хвойные леса. На юго-западе выделяются буро-таежные почвы елово-кедрово-лиственничных лесов. Наибольшую площадь бассейна Уссури занимают типы горно-лесных бурых почв хвойно-широколиственных лесов и бурые лесные почвы мелкосопочников. К равнинной территории долины Арсеньевки приурочены разновидности бурых почв. Под пашни выбраны луговые глеевые почвы на речных террасах и равнинах [7].

Климат бассейна определен его положением на побережье Тихого океана и муссонным характером атмосферной циркуляции. Средняя температура зимой -18° , летом $+20^{\circ}\text{C}$. В горной части бассейна выпадает до 1000 мм осадков, на равнине – это значение на 300-400 мм меньше. Осадки выпадают преимущественно летом.

Питание рек в основном дождевое: более 80% стока приходится на весенне-летний период с апреля по сентябрь, зимняя межень дает всего 2-5% годового стока.

Технологические и информационные ресурсы. Пространственно-распределенная модель формирования стока в речных бассейнах ECOMAG [2, 3], разработанная на основе достижений школы физико-математического моделирования гидрологических процессов [6], описывает основные процессы гидрологического цикла суши в бассейнах рек со смешанным дождевым и снеговым питанием. Модель была адаптирована к условиям и информационному обеспечению в бассейне р. Уссури [8]. Модельная пространственная схематизация речного бассейна и его русловой сети выполнялась с помощью технологии *ECOMAG-extension*, на базе электронных карт региона. Анализируя линии тока по цифровой модели рельефа (ЦМР) в автоматическом режиме с различной степенью детальности, технология позволяет прописывать структуру речной сети, выделять линии водоразделов (границы элементарных водосборов), являющихся пространственными расчетными единицами модели, и на основе почвенной и ландшафтной цифровых карт местности задавать статистику типов почв и ландшафтов на расчетных участках.

В качестве картографических информационных ресурсов для схематизации водосборной площади р. Уссури использовались ЦМР на основе SRTM с разрешением 80x80 м и цифровые почвенная и ландшафтная карты бассейна масштаба 1:100000, специально разработанные для этого бассейна [7]. При модельной схематизации бассейна выделены частные водосборные площади 800 расчетных элементов, их средняя площадь составляет около 30 км², модельная речная сеть кроме главной реки включает 69 притоков 1-го порядка, впадающих в главную реку, 157 – 2-го порядка, 129 – 3-го, 42 – 4-го и 4 притока 5-го порядка (рис. 1).

Гидрометеорологическая сеть бассейна р. Уссури до п. Кировский отличается повышенной плотностью и высоким качеством гидрометрических наблюдений, представляя собой, так называемый, “Уссурийский испытательный полигон” для научно-методических разработок. Для задания метеорологических воздействий на водосбор использовались ежесуточные метеорологические данные по 8-ми метео-

станциям (температура и влажность воздуха, осадки) и данные измерений осадков на 15-ти гидропостах за период 1979 – 2012 гг. (см. рис.1). Ежесуточные гидрометрические данные по 14 гидрологическим постам, расположенным на основной реке Усури и ее притоках, за этот же период использовались для калибровки параметров и валидации модели (рис.1).

Калибровка параметров модели. Калибровка параметров модели ECOMAG проводилась по суточным гидрографам стока на 14-ти гидропостах для периода 1979 – 1989 гг., валидация выполнялась для периода 1990-2012 гг. Большая часть параметров модели ECOMAG задавалась из баз данных характеристик почв, растительности и речных бассейнов. Несколько ключевых параметров подбирались путем калибровки модели по отклонениям рассчитанных гидрографов стока от фактических значений. В качестве целевой функции за основу был принят распространенный в гидрологических расчетах критерий Нэша–Сатклифа (NS):

$$NS = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2}, \quad (1)$$

где $F_0^2 = \sum_i (Q_i - Q_{cp})^2$, $F^2 = \sum_i (Q_{i,p} - Q_i)^2$, $Q_{i,p}$ – рассчитанный по модели расход воды в i -е сутки, Q_i – фактический расход, Q_{cp} – средняя величина фактического расхода воды за период расчета. Чем ближе NS к единице, тем выше точность моделирования,

При гидрологических расчетах по модели ECOMAG на каждом временном шаге выполняется моделирование характеристик стока во всех ячейках речной сети, поэтому в рамках одного расчета имеется возможность сопоставления рассчитанных и измеренных гидрографов стока во всех точках модельной речной сети, соответствующих пунктам расположения мониторинговой гидрометрической сети. Критерий (1) показывает степень соответствия рассчитанных и фактических гидрографов для одной мониторинговой точки речной сети, например, в замыкающем створе водосбора. Для целей одновременного учета эффективности модели в нескольких мониторинговых точках существуют следующие возможности задания целевой функции:

1. осредненный критерий в виде $NS_{mean} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M NS_i$, где M – количество пунктов

сравнения;

2. средневзвешенный критерий NS_{total} в виде (1), где $F_0^2 = \sum_k \sum_i (Q_{i,k} - Q_{cp})^2$,

$F^2 = \sum_k \sum_i (Q_{i,k,p} - Q_{i,k})^2$, $Q_{i,k,p}$ – рассчитанный по модели расход воды в i -е сутки

в k -ом пункте сравнения, $Q_{i,k}$ – фактический расход в i -е сутки в k -ом пункте срав-

нения, $Q_{cp} = \frac{1}{MN} \sum_k \sum_i Q_{i,k}$ – средневзвешенная по всем пунктам сравнения M величина фактического расхода воды за период расчета в N суток.

Если в первом случае всем гидропостам придаются равные веса, то во втором случае большие веса придаются гидропостам с большими среднегодовыми расходами. Еще один критерий BIAS характеризует относительную погрешность расчета среднегодовых объемов стока.

В табл. 1 приведены значения критериев NS и BIAS по отдельным гидропостам для периодов калибровки и валидации модели, а также значения осредненных для всех гидропостов критериев NS_{mean} , NS_{total} и BIAS.

Таблица 1. Значения критериев соответствия фактических и рассчитанных гидрографов стока для калибровочной и проверочной серий

| Гидро-пост | Киро | Кокш | Яков | Ново | Убор | Анто | Ануч | Вбре | Изви | Крыл | Сама | Вино | Мура | Каме | Total | Mean |
|---------------------------------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| тыс.км ² | 24.4 | 9.34 | 5.18 | 5.17 | 3.35 | 2.67 | 2.48 | 1.8 | 1.16 | 1.07 | 1.03 | 0.94 | 0.76 | 0.14 | | |
| Калибровка 1979-1989 гг. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NS | 0.79 | 0.72 | 0.75 | 0.76 | 0.76 | 0.67 | 0.76 | 0.72 | 0.7 | 0.18 | 0.73 | 0.68 | 0.74 | 0.49 | 0.8 | 0.7 |
| BIAS% | -3.79 | -8.8 | 9.53 | -1.31 | -12.8 | -9.14 | -6.46 | -12.8 | -17.6 | 7.3 | -13.8 | -10.5 | -7.82 | -36.1 | -5.2 | 8.9 |
| Валидация 1990-2012 гг. | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NS | 0.79 | 0.8 | 0.73 | 0.64 | 0.75 | 0.64 | 0.76 | 0.57 | 0.42 | 0.42 | 0.52 | 0.63 | 0.62 | -0.1 | 0.8 | 0.6 |
| BIAS% | -1.9 | 0.4 | -3.6 | 20.6 | -5.4 | -5.3 | 6.25 | 2.6 | 7.2 | 7.9 | -1.8 | 8.8 | -16.3 | -14.2 | 0.6 | 0.4 |

Из табл. 1 видно, что значения критериев для калибровочной и проверочной серии не сильно отличаются между собой, что говорит об устойчивости параметров модели. Кроме того, за период калибровки для 5-х гидропостов из 14-ти результаты соответствия гидрографов можно признать хорошими ($NS > 0.75$), для одного гидропоста – неудовлетворительными ($NS < 0.35$), в остальных случаях – удовлетворительными. Для проверочной серии расчетов количество гидропостов с хорошими, удовлетворительными и неудовлетворительными результатами составило соответственно 4, 9 и 1. Значения осредненного критерия NS_{mean} для калибровочного и проверочного периодов расчета составили соответственно 0.68 и 0.58, а средневзвешенного NS_{total} – 0.82 и 0.83. По критерию $(BIAS)_{abc}$ погрешности расчета среднегодовых объемов стока, превышающих 10, 15 и 20%, отмечались соответственно на 3, 1 и 1 гидропосте – для периода калибровки и 1, 1 и 1 гидропосте – для периода валидации модели. Значения BIAS по всем гидропостам за период калибровки составили 8.9 и -5.2% соответственно для вариантов осредненного и средневзвешенного критериев, а для проверочной серии расчетов – соответственно 0.6 и 0.38%.

Чувствительность модели к плотности задания осадкомерной сети оценивалась в результате проведения следующего численного эксперимента. Для задания граничных условий модели использовались только ежесуточные данные по 8-ми метеостанциям в отличие от проанализированного выше первого случая, когда для задания метеорологических воздействий на водосбор в дополнение к ним привлекались данные ежесуточных измерений по осадкомерам на 15-ти гидропосте.

Результаты этих численных экспериментов приведены в табл. 2 и показывают, что сокращение плотности осадкомерной сети снижает точность расчетов по критерию NS для 8-ми створов из 14-ти на 0.08 и более. Лишь для одного гидропоста получилось улучшение результатов. Значения осредненных критериев NS_{mean} и NS_{total} составили соответственно 0.62 и 0.83 для варианта с плотной сетью осадкомеров и 0.56 и 0.79 для варианта без учета осадкомеров на гидропосте.

Таблица 2. Чувствительность модели к плотности задания осадкомерной сети (за весь период расчета 1979-2012 гг.)

| Гидро-пост | Киро | Кокш | Яков | Ново | Убор | Анто | Ануч | Вбре | Изви | Крыл | Сама | Вино | Мура | Каме | Total | Mean |
|----------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| тыс.км ² | 24.4 | 9.34 | 5.18 | 5.17 | 3.35 | 2.67 | 2.48 | 1.8 | 1.16 | 1.07 | 1.03 | 0.94 | 0.76 | 0.14 | | |
| 23 осадкомера | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NS | 0.79 | 0.76 | 0.74 | 0.68 | 0.75 | 0.65 | 0.76 | 0.62 | 0.51 | 0.36 | 0.57 | 0.66 | 0.65 | 0.18 | 0.8 | 0.6 |
| BIAS% | -2.42 | -2.19 | 1.44 | 14.1 | -7.6 | -6.3 | 2.2 | -2.1 | -0.9 | 7.7 | -5.2 | 1.5 | -14.1 | -21.5 | -1.1 | 2.5 |
| 8 осадкомеров | | | | | | | | | | | | | | | | |
| NS | 0.75 | 0.67 | 0.72 | 0.6 | 0.67 | 0.53 | 0.68 | 0.5 | 0.42 | 0.51 | 0.55 | 0.58 | 0.57 | 0.14 | 0.79 | 0.56 |
| BIAS% | -4.1 | -1.5 | -3.4 | 13.6 | -6.6 | -4.4 | -2.4 | -2.51 | -1.9 | -4.3 | -9 | -2.3 | -18.1 | -18.7 | -2.4 | -4.7 |

Заключение. Выполнена адаптация пространственно-распределенной физико-математической модели формирования стока ECOMAG для бассейна р. Уссури. Результаты испытаний модели по данным о стоке на 14-ти гидропостах за многолетний период показали, в целом, хорошее качество моделирования и подтвердили возможность использования модели ECOMAG для речных бассейнов, расположенных в условиях муссонного климата.

Проведенные численные эксперименты показали, что с увеличением плотности осадкомерной сети за счет привлечения данных по осадкам на гидропостах результаты моделирования стока существенно улучшаются, что является косвенным свидетельством достоверности и надежности этих данных в регионе.

Литература

1. Fu S., T.O. Sonnenborg, K.H. Jensen, X. He. Impact of Precipitation Spatial Resolution on the Hydrological Response of an Integrated Distributed Water Resources Model // *Vadose Zone J.*, 2011, 10: 25–36, doi:10.2136/vzj2009.0186.
2. Motovilov Yu.G., L.Gottschalk, K.Engeland and A.Rodhe. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1999, 98-99, pp.257-277.
3. Мотовилов Ю.Г. Моделирование формирования стока в речных бассейнах при изменении пространственных масштабов: 1. Алгоритмы генерализации и осреднения // *Водные ресурсы*. 2016. № 3, С. 243-253. 2. Результаты испытаний // *Водные ресурсы*. 2016. № 5, С. 476-491.
4. Мотовилов Ю.Г. Моделирование полей речного стока (на примере бассейна Лены) // *Метеорология и гидрология*, 2017, № 2, С. 78-88.
5. Гарцман Б.И., Губарева Т.С. Прогноз гидрографа дождевых паводков на реках Дальнего Востока // *Метеорология и гидрология*. 2007. № 5, С. 70-80.
6. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока (Физико-математические модели). М.: Наука, 1983, 216 с.
7. Бугаец А.Н., Пиеничникова Н.Ф., Терешкина А.А., Краснопеев С.М., Гарцман Б.И., Голодная О.М., Ознобихин В.И. Цифровая почвенная карта бассейна р. Уссури // *Почвоведение*. 2017, № 8, с. 1–10.
8. Бугаец А.Н., Гончуков Л.В., Соколов О.В., Гарцман Б.И., Краснопеев С.М. Автоматизированная информационная система гидрологического мониторинга и управления данными // *Метеорология и гидрология*. 2017, №3, С. 103–113.