

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РЕКИ АМУР НА БАЗЕ ИНФОРМАЦИОННО- МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ЕСОМАГ**

Калугин А.С.

Институт водных проблем РАН, г. Москва

kalugin-andrei@mail.ru

Бассейн р. Амур относится к паводкоопасным регионам. Масштабные катастрофические наводнения на всем водосборе наблюдались в 1897, 1928, 1953, 1958, 1959, 1972, 1984 и 2013 гг. При решении задач прогнозирования быстроразвивающихся паводков и своевременного предотвращения ущербов от наводнений ситуация осложняется тем, что для бассейна р. Амур характерна редкая сеть наблюдений за расходами воды. Например, на трансграничных участках рек Аргунь, Уссури и Амур выше г. Хабаровска ведутся регулярные наблюдения только за уровнями воды. Разработка модели формирования стока р. Амур является чрезвычайно актуальной, в том числе для получения информации о расходах воды на участках рек, не освещенных наблюдениями за стоком. Ранее на основе имеющихся данных наблюдений на сети Росгидромета была разработана модель формирования стока двух притоков р. Амур – рек Зеи и Буреи [1].

В рамках данной работы впервые представлена физически обоснованная модель формирования речного стока с распределенными параметрами для всего бассейна р. Амур, включая его китайскую часть, и описаны результаты испытаний модели по данным о ежедневных расходах воды на разных участках реки и ее притоков. Модель разработана на базе информационно-моделирующего комплекса ЕСОМАГ (Ecological Model for Applied Geophysics) [2]. Этот комплекс включает в себя модель формирования речного стока с распределенными параметрами, специализированную геоинформационную систему Ecomag extension, почвенные, ландшафтные и гидрометеорологические базы данных. Модель описывает основные процессы гидрологического цикла суши в бассейнах рек со смешанным дождевым и снеговым питанием: формирование снежного покрова и снеготаяние, инфильтрацию воды в почву и испарение, термический и водный режим почвы с учетом процессов ее промерзания и оттаивания, формирование поверхностного, внутриводного, грунтового и речного стока.

**Схематизация водосбора и информационное обеспечение модели.** Пространственная схематизация речного бассейна и русловой сети проводилась на основе цифровой модели рельефа разрешения 1 км с использованием модуля Ecomag в ГИС-пакете ArcView 3.2. При схематизации водосбора р. Амур выделялись элементарные речные водосборы площадью не менее 500 км<sup>2</sup>. Рассчитанная по модельной структуре речной сети площадь водосбора р. Амур составила 1837000 км<sup>2</sup> с погрешностью определения менее 1% (по данным [3] площадь бассейна 1855000 км<sup>2</sup>). Средняя площадь построенных элементарных речных водосборов 976 км<sup>2</sup>.

Структура модели ЕСОМАГ основана на частных речных водосборах, которые являются расчетными элементами модели. Это позволяет отразить пространственные неоднородности рельефа, почв, землепользования, гидрометеорологических полей. На основе почвенных и ландшафтных баз данных с разрешением 1 км определяются сочетания типов почв и землепользования на частных водосборах.

Характеристики механического состава 70 типов почв для модели бассейна р. Амур были взяты из глобальной почвенной базы данных HWSD. По величинам процентного содержания песка, глины, гравия и органического вещества с применением педотрансферных функций для каждого типа почв рассчитывались следующие почвенно-гидрологические константы, задаваемые как параметры модели: объемная плотность, пористость, наименьшая полевая влагоемкость, влажность завядания, коэффициент фильтрации.

Часть параметров модели заданы по данным международной базы типов землепользования Global Land Cover. Для каждого из 41 выделенных типов землепользования определялись следующие параметры модели: коэффициенты вертикальной фильтрации и стаивания, испарения почвенной влаги и промерзания почвы.

Кроме того, по данным ВНИИГМИ-МЦД для бассейна р. Амур и окрестности в 100 км была подготовлена база метеорологических характеристик, необходимых для модельных расчетов. Эта база включает среднесуточные величины температуры и влажности воздуха, количества осадков по 232 метеостанциям, из которых 169 приходятся на российскую часть бассейна (рис. 1).

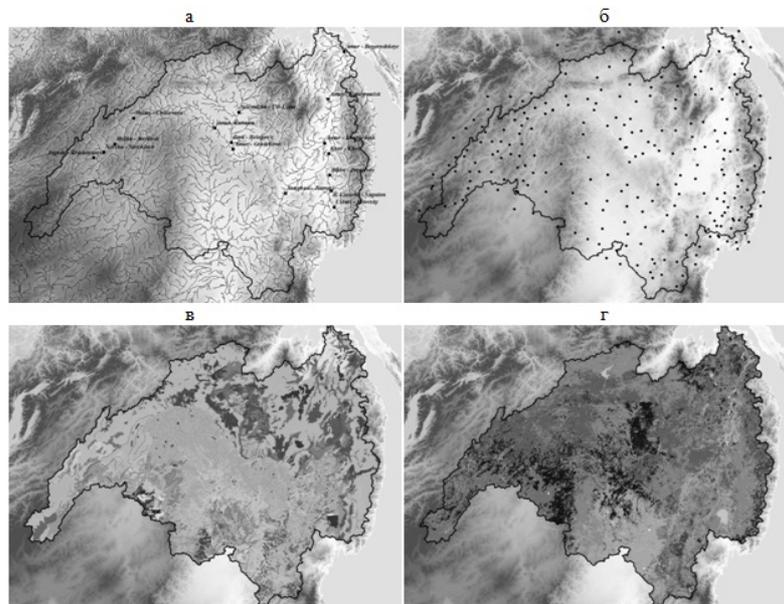


Рис. 1—Карта-схема бассейна р. Амур с обозначением источников исходных данных для моделирования: а - гидрологических постов, б – метеостанций, в – типов почв, г – типов землепользования

**Калибровка и верификация модели.** Для регулирования стока и борьбы с регулярными наводнениями на Дальнем Востоке в бассейне р. Амур были построены крупные водохранилища: Зейское на р. Зее (площадь водосбора  $F=83800 \text{ км}^2$ ), Бурейское на р. Бурее ( $F=65200 \text{ км}^2$ ) и несколько водохранилищ в бассейне р. Сунгари (Фэнмань, Байшань, Лианхуа, Ниэрцзы). В связи с этим при расчетах в качестве входного расхода были заданы сбросы Зейского и Бурейского гидроузлов в соответствующих створах, а также расходы р. Сунгари по г/п Цзямусы ( $F=528000 \text{ км}^2$ ), так как данных по сбросам из китайских водохранилищ в свободном доступе нет. Расчет за 2000 г. используется как период установления параметров физико-математической модели. Калибровка параметров модели для бассейна р. Амур проводилась для периода с 2001 по 2005 гг. Для калибровки модели необходима информация по суточным расходам воды. Как уже отмечалось, выше г. Хабаровск ведутся измерения только уровней воды р. Амур, поэтому данные по расходам воды были восстановлены по кривым зависимостей  $Q=f(h)$  на гидрометрических постах Кумара и Гродеково.

В модели ECOMAG калибруются не параметры частных речных водосборов, а параметры типов почв, растительности и подстилающей поверхности для всего речного бассейна. Поэтому, моделируя бассейн такой крупной реки как р. Амур в рамках единой модели, рассчитывается сток в любой точке речной системы, что позволяет учесть особенности формирования стока не только на главной реке, но и на притоках. Калибровка параметров проводилась по наилучшему совпадению рассчитанных и фактических суточных гидрографов стока.

В качестве критерия соответствия рассчитанных и фактических суточных гидрографов используется критерий Нэша-Сатклифа NS. Согласно практике гидрологических расчетов результаты считаются хорошими при  $NS > 0.75$  и удовлетворительными при  $0.75 > NS > 0.35$ .

На рис. 2 представлены фактические и рассчитанные суточные гидрографы стока рек бассейна Амура. Значения критерия соответствия фактических и рассчитанных суточных гидрографов в створах гидрометрических постов для периода калибровки модели составили от 0.46 до 0.87 (см. табл. 1). Кроме расчета критерия Нэша-Сатклифа по суточным расходам для каждого гидрометрического поста оценена степень тесноты связи рассчитанных и фактических объемов стока за месяц с помощью корреляционного отношения  $R^2$ .

Проверка модели для бассейна р. Амур проводилась на независимых данных измерений за период с 2006 по 2010 гг. Как видно из рис. 2, модель позволила с удовлетворительной точностью воспроизвести гидрографы стока. Для периода верификации модели значения критерия соответствия фактических и рассчитанных суточных гидрографов варьируются от 0.49 до 0.86 (табл. 1). Корреляционное отношение линейной связи рассчитанных и фактических объемов стока за месяц в створах гидрометрических постов составило от 0.62 до 0.94.

Ухудшение критерия соответствия фактических и рассчитанных расходов воды в створах некоторых гидропостов (Кумара, Гродково, Богородское 2003 г., Комсомольск-на-Амуре 2007-2010 гг.) во многом объясняется неточностью определения фактических расходов по информации об уровнях воды с помощью кривых зависимостей  $Q = f(h)$ .

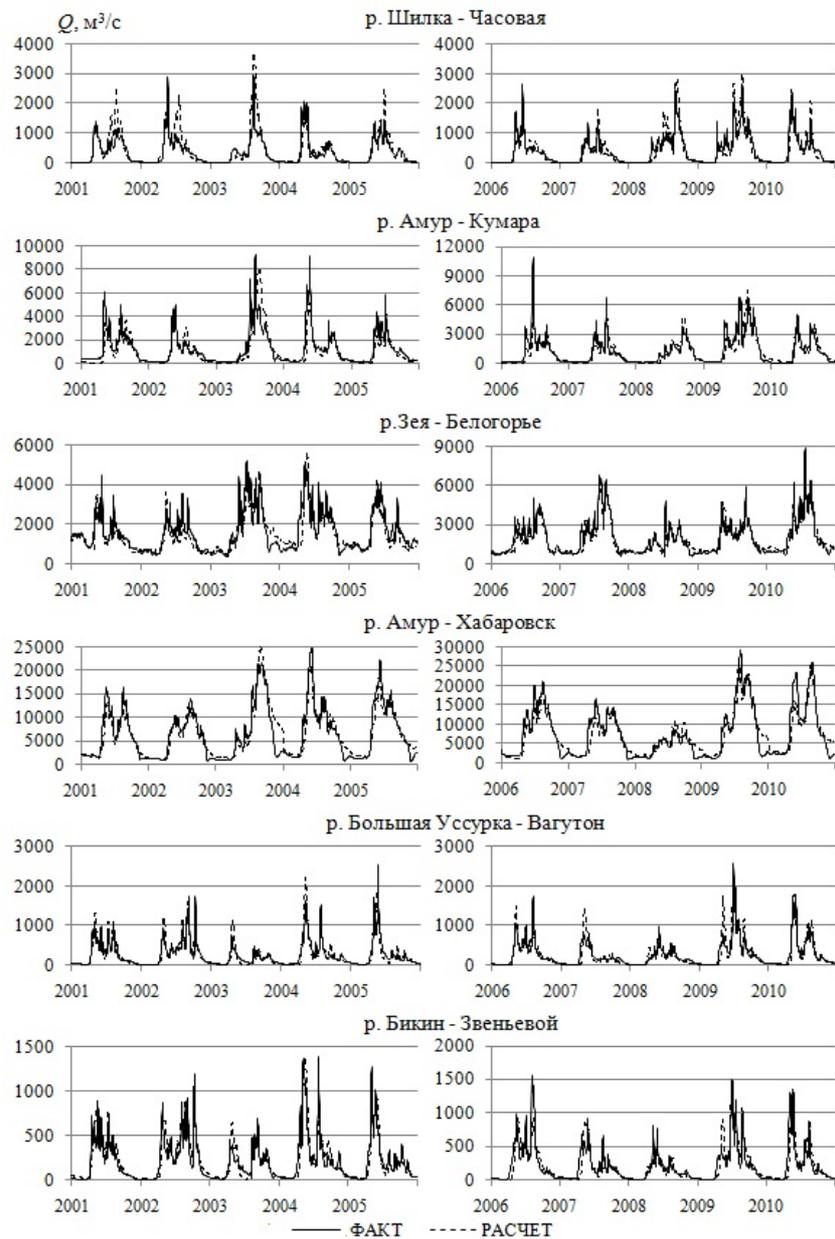


Рис. 2 – Фактические и рассчитанные гидрографы стока рек бассейна Амура за период калибровки и верификации модели

Таблица 1 – Значения критериев соответствия суточного и месячного стока в бассейне р. Амур

Река, гидрометрический пост	Площадь водосбо- ра, тыс. км <sup>2</sup>	Период калибровки 2001-2005 гг.		Период верификации 2006-2010 гг.	
		NS	R <sup>2</sup>	NS	R <sup>2</sup>
		сутки	месяц	сутки	месяц
Ингода - Красноярово	37	0.50	0.72	0.57	0.84
Нерча – Нерчинск	27.5	0.69	0.86	0.67	0.81
Шилка – Сретенск	175	0.52	0.79	0.70	0.82
Шилка – Часовая	200	0.46	0.80	0.71	0.87
Амур – Кумара	478	0.65	0.78	0.75	0.82
Зея – Белогорье	229	0.77	0.87	0.84	0.94
Селемджа – Усть-Ульма	67	0.78	0.91	0.69	0.89
Амур – Гродеково	726	0.73	0.85	0.81	0.90
Уссури – Кировский	24.4	0.52	0.61	0.49	0.62
Большая Уссурка – Вагутон	23	0.75	0.93	0.75	0.91
Бикин – Звеньевой	21.4	0.80	0.89	0.72	0.84
Хор - Хор	24.5	0.66	0.83	0.71	0.92
Амур – Хабаровск	1630	0.87	0.89	0.86	0.90
Амур – Комсомольск	1730	0.84	0.90	0.70	0.85
Амур - Богородское	1790	0.73	0.83	0.84	0.90

Оценка качества модельных расчетов по критерию NS для каждого гидрометрического поста формирует более жесткие требования к модели, настраиваемой не на отдельные речные бассейны (например, рек Зеи, Буреи, Уссури или замыкающего створа бассейна Амура), а на весь бассейн р. Амур в целом в рамках единого расчета. Ясно, что условия формирования стока в разных частях бассейна р. Амур существенно отличаются, но в тоже время физически обоснованная модель гидрологического цикла ECOMAG позволяет учесть эту неоднородность.

### Литература

1. Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Калугин А.С. Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // Водные ресурсы. 2014. Т.41. №2. С.111-122.
2. Motovilov Yu.G., Gottschalk L., Engeland L., Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation // Agricultural and Forest Meteorology. 1999. V.98-99. P.257-277.
3. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1. Вып.19. Бассейны Амура (без бассейнов Шилки, Аргуни, Уссури, Амазара) и Уды. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 411 с.