

УДК556.535:004.9(571)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЖДЕВОГО СТОКА В БАССЕЙНЕ РЕКИ ЧАРЫШ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА HEC-HMS

В.Ю. Филимонов, О.В. Ловцкая, А.Б. Голубева

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, E-mail: lov@iwep.ru

В работе представлены результаты расчета дождевого стока в бассейне р. Чарыш в период летней межени с использованием программного комплекса HEC-HMS. По цифровой модели рельефа бассейна построена система подбассейнов, определены центры тяжести и линии дренажа для каждого подбассейна, построен гидрологический граф и вычислены морфометрические характеристики его элементов. На основе почвенной базы данных Harmonized World Soil Database и почвенной карты Алтайского края разработана карта текстуры (механического состава) почв бассейна р. Чарыш. Для определения количества осадков на водосборе использован набор данных Persiann-CDR. Выполнено расчленение гидрографа для р. Чарыш в период выпадения дождевых осадков.

Ключевые слова: бассейн реки Чарыш, гидрологический граф бассейна, формирование поверхностного дождевого стока, расчленение гидрографа, программный комплекс HEC-HMS.

DOI: 10.24412/2410-1192-2021-16004

Дата поступления 18.01.2021

Формирование дождевых паводков определяется двумя группами физико-географических факторов: климатическими и ландшафтными [1–3]. Основными из климатических являются: атмосферные осадки, испарение, температура воздуха и др.: «В формировании дождевых паводков главная роль принадлежит атмосферным осадкам» [4, с. 23]. К неклиматическим факторам относятся почвенные характеристики водосбора, геологическое строение речного бассейна, растительность и рельеф [3–8]. Таким образом, для расчета дождевого стока необходимо иметь исчерпывающую информацию о количестве дождевых осадков, их распределении на водосборе и о ландшафтной структуре водосбора.

Существует большое количество коммерческих программных продуктов для выполнения различных гидрологи-

ческих расчетов, среди которых можно выделить несколько довольно известных систем, имеющих длительный период эксплуатации и положительный опыт применения для различных водосборов и различных климатических условий [9]. В отличие от коммерческих пакетов программный комплекс HEC-HMS (далее HEC-HMS) с развитой функциональностью для расчета динамики расходов в речном бассейне по данным о сумме выпавших осадков с учетом пространственной изменчивости почвенных и растительных характеристик распространяется бесплатно и не имеет ограничений по использованию [10].

Вопросы оценки объемов талого стока и его влияния на гидрологический режим р. Чарыш рассмотрены в [11]. Однако модели оценки объемов дождевого стока в бассейне р. Чарыш ранее не

рассматривались, что и определило цели и задачи настоящего исследования.

Река Чарыш (левый приток Оби) берет начало на Коргонском хребте (Республика Алтай). Длина реки составляет 547 км, площадь водосборного бассейна – 22000 км². В верхнем течении Чарыш протекает по горной местности, в нижнем течении выходит на широкую равнину. Климат бассейна р. Чарыш умеренно континентальный с не слишком суровой зимой и умеренно теплым летом.

Питание реки смешанное с преобладанием снегового. Поверхностный сток в верховьях формируется за счет талых вод – 49 %, дождевых осадков – 30 % и грунтовых вод – 21 %. С уменьшением высоты местности доли дождевого стока и грунтовых вод в питании реки заметно сокращаются [4].

Половодье многопиковое, растянутое (с апреля по июль) за счет таяния снега сначала на равнине, позднее в горах на разных высотах. Максимум половодья приходится на конец мая – начало июня. Уровень воды поднимается на 3–5 м, а при интенсивном снеготаянии – до 8 м, скорость течения увеличивается в 1,5–2 раза. На спаде половодья проходят дождевые паводки. Максимальный расход воды у с. Белоглазово – 2090 м³/с, среднегодовой расход воды – 205 м³/с (объем стока 6,47 км³/год). Осенью и зимой минимальные расходы воды уменьшаются до 42,0 м³/с [12–13]. Дождевые паводки наиболее выражены на участках реки в горных районах, менее – на реках равнинных возвышенностей и наблюдаются в течение всего теплого периода года: с апреля по октябрь [4].

Моделирование дождевого стока в бассейне р. Чарыш позволяет решить

две задачи: определить и подготовить исходные данные, необходимые для дальнейших сценарных расчетов; подготовить адекватные комплексные данные для прогнозирования речного стока в бассейне р. Чарыш при различной интенсивности и продолжительности выпадения дождевых осадков.

Использование программного модуля НЕС-GeoHMS для создания гидрологических входных данных

Программный модуль НЕС-GeoHMS [14] предоставляет набор инструментов для геопространственного анализа водосбора. НЕС-GeoHMS использует ArcGIS® Desktop и дополнительный модуль SpatialAnalyst для подготовки входных данных для системы гидрологического моделирования НЕС-HMS. С использованием цифровых данных о местности строится гидрологическая схема бассейна (дренажные пути и границы водосборов), вычисляются морфометрические характеристики ее элементов, и формируется гидрологический граф (рис.1) [15].

В рамках гидрологической модели водосбора каждый элемент созданного гидрологического графа характеризуется параметрами, определяющими формирование поверхностного стока. В программном комплексе НЕС-HMS эти параметры рассчитываются последовательно с использованием четырех математических моделей: модель расчета потерь стока, модель трансформации осадков в поверхностный сток (прямой сток), модель расчета подземного (базисного) стока и модель перемещения потока. Ниже рассмотрены первые три модели, описывающие формирования стока в подбассейнах.

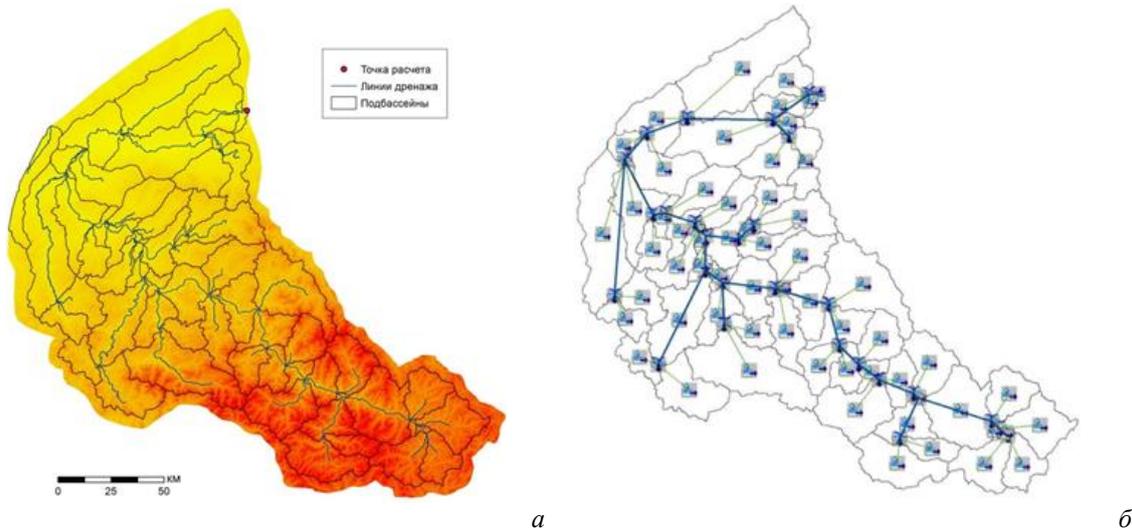


Рис. 1. Результаты работы модуля модуль HEC-GeoHMS для р.Чарыш: а – подбассейны гидрологическая сеть водосбора; б – гидрологический граф бассейна

Исходные ландшафтные и метеорологические данные

Механический состав почвы. Для оценки поверхностного стока подготовлена карта текстуры (механического состава) почв водосбора р. Чарыш на основе почвенной базы данных Harmonized World Soil Database (HWSD) [16] и почвенной карты Алтайского края (масштаб 1: 1 600 000) [16] (рис.2). Почвенная база данных HWSD – это растровая база данных с разрешением 30", содержащая более 15000 единиц почвенного картирования и набор атрибутивных данных в формате MSAccess. Распределение типов почв по данным HWSD на территории РФ соответствует почвенной карте масштаба 1: 2 500 000 [17]. Использование уникального ключа для каждого почвенного контура позволя-

ет связать данные атрибутивной таблицы с растровой картой для отображения состава параметров для каждого типа почв (горизонтов А и В): доля (%) гравия, песка, глины, пыли и органического вещества, объемная плотность, мощность горизонта почвы, текстурный и гранулометрический класс и другие физико-химические показатели.

В соответствии с таблицей 1 для каждого подбассейна с использованием инструмента Zonal Statistics (ArcMap, Spatial Analyst Tools) рассчитаны средний максимальный и минимальный коэффициенты инфильтрации (рис. 3). Значения коэффициентов фильтрации, характеризующих предельную инфильтрационную способность грунтов, в таблице 1 обозначены как коэффициенты потерь [18–21].

Таблица 1

Коэффициент фильтрации грунтов

Тип почвы	Описание	Коэффициент потерь, мм/час
A	Крупный песок, глубокий лёсс	7,62-11,43
B	Мелкий песок, суглинок	3,81-7,62
C	Глинистые суглинки, мелкие песчаные суглинки, почвы с низким содержанием органических веществ и почвы с высоким содержанием глины	1,25-3,81
D	Глины, монолитные нетрещиноватые скальные породы	0-1,25



Рис. 2. Карта текстур почв

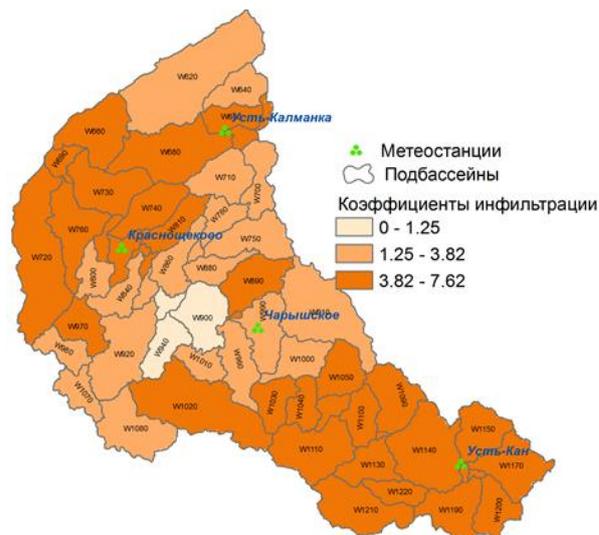


Рис. 3. Карта средних минимальных коэффициентов инфильтрации, мм/час

Как следует из рисунка 3, коэффициент инфильтрации на водосборе меняется в диапазоне от 0 до 11,43 мм/час. Очевидно, что эти рассчитанные значения не дают точных представлений о распределении коэффициента фильтрации на водосборе. Однако их можно использовать как начальные приближения параметров для оценки поверхностных и грунтовых (базисных) стоков.

Метеоданные. Количество осадков, выпадающих на водосбор, – один из главных факторов формирования стока. Точность его определения оказывает существенное влияние на качество прогнозов объема стока, расходов и уровней воды в реках. На равнинной территории при условии достаточной плотности сети метеостанций оценка количества и пространственного распределения осадков может быть получена путем простой пространственной интерполяции [22]. Однако в условиях сложного рельефа существующая ограниченная наблюдательная сеть не учитывает мезомасштабные неоднородности распределения осадков. Для решения проблемы восстановления количества осадков в районах с пересеченным рельефом предложено несколько подходов. В зависимости от площади бассейна для этого могут использоваться как мезомасштабные, так и глобальные мо-

делей атмосферы [23], а также данные дистанционного зондирования земли.

Для определения количества осадков, выпавших в бассейне, использован набор данных PERSIANN-CDR [24–25]. PERSIANN-CDR (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks – Climate Data Record*) обеспечивает оценки суточных осадков на сетке $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ для полосы $60^\circ\text{N}–60^\circ\text{S}$ за период с 1.01.1983 г. по настоящее время. Система PERSIANN, разработанная Центром гидрометеорологии и дистанционного зондирования (CHRS) Калифорнийского университета в Ирвине (UCI), использует алгоритмы нейронной сети и аппроксимацию данных наблюдений для вычисления оценки интенсивности дождя на каждом пикселе инфракрасного яркостного температурного изображения, полученного с геостационарных спутников.

Рисунок 4 иллюстрирует распределение осадков на водосборе р. Чарыш на выбранную дату. На различных участках водосбора р. Чарыш за 1.06.2000 данные PERSIANN-CDR показывают сумму суточных осадков от 0 до 10 мм. По информации Росгидромета количество осадков, определенных на метеостанциях за ту же дату, изменялось от 0,5 до 6 мм/сут.

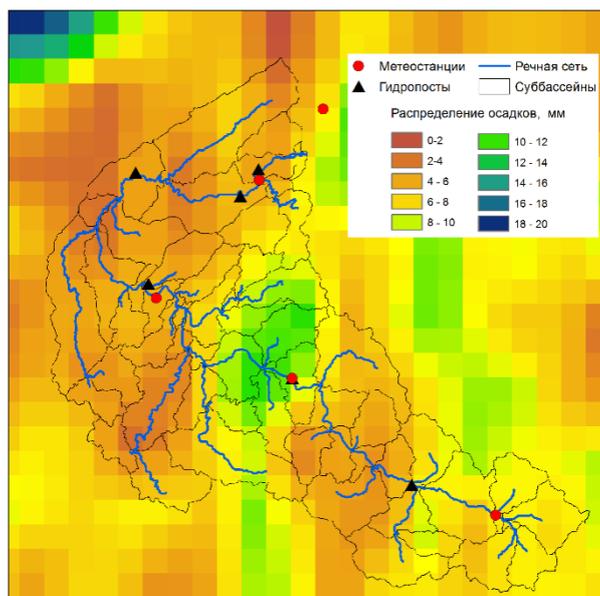


Рис. 4. Пространственное распределение осадков на 1.06.2000 г., рассчитанное по данным PERSIANN-CDR

Модель оценки потерь осадков

Вода, поступающая на поверхность земли в виде осадков, не в полном объеме преобразуется в поверхностный сток. Часть ее испаряется, часть расходится на увлажнение и потребление растительностью, часть сохраняется на поверхности в виде луж, покрывающих неровности микрорельефа, часть впитывается в почву.

Объем расходования воды зависит от метеорологических условий, свойств растительности, почв, микрорельефа. В гидрологической модели программного комплекса HES-HMS модели оценки потерь стока позволяют определить объем образующегося поверхностного стока, объем потребленной почвой влаги и восполнение подземных вод.

Из доступных в программном комплексе моделей оценки потерь использована однослойная модель Deficit and constant loss [26]. Для упрощения описания потерь стока, обусловленных поверхностными и внутрипочвенными процессами, в модели рассматриваются только два режима: инфильтрация во время дождя и суммарное испарение за период между дождями. Осадки, пре-

вышающие способность слоя удерживать воду, трансформируются в поверхностный сток.

Слой почвы, рассматриваемый в модели Deficit and constant loss, характеризуется максимальной способностью удерживать воду. Почва может иметь определенный дефицит влаги в начале дождя. Если почва полностью насыщена, дефицит влаги полагается равным нулю; если слой имеет дефицит больше нуля, то все осадки будут просачиваться до тех пор, пока почва не станет насыщенной. Вся просочившаяся вода остается в почве. Таким образом, модель Deficit and constant loss предполагает: если скорость инфильтрации превышает скорость выпадения осадков, то поверхностный сток отсутствует.

Модель расчета базисного стока

Базисный сток (сток, обусловленный грунтовым питанием) при моделировании дождевых паводков обычно не играет значительной роли в формировании их гидрографов. Тем не менее, составляющая базисного стока важна для моделирования границ спада гидрографов паводков, а также для более точной

оценки объемов поверхностного стока. Из доступных в программном комплексе НЕС-HMS методов оценки базисного стока выбран метод рецессии (Exponential Recession Model), достоинством которого является простота как самого метода, так и его применения [26].

В модели экспоненциальной рецессии базисный поток в момент времени Q_t определяется как $Q_t = Q_0 k^t$, где Q_0 – начальный базисный сток (в нулевой момент времени); k – постоянная экспоненциального затухания.

Модель трансформации осадков в поверхностный сток

Для оценки поверхностного стока на водосборе используется модифицированный метод Кларка (ModClark), реализующий модель с распределенными параметрами, в которой явно учитывается пространственная изменчивость характеристик и процессов. В методе ModClark подбассейн рассматривается как набор ячеек сетки, для каждой ячейки которого используется отдельный индекс времени добега. Индекс для каждой ячейки нормируется на максимальное время добега для подбассейна:

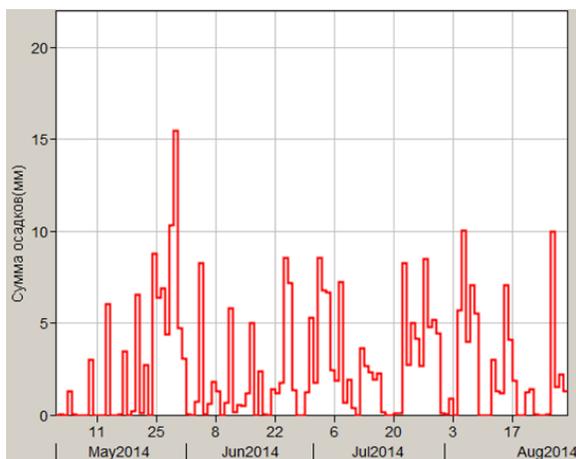
$$T_{cell} = T_c \frac{d_{cell}}{d_{max}},$$

где T_{cell} – время добега для ячейки сетки; T_c – время добега для подбассейна; d_{cell} – расстояние от ячейки до расчетной точки; d_{max} – расстояние от максимально удаленной ячейки до расчетной точки.

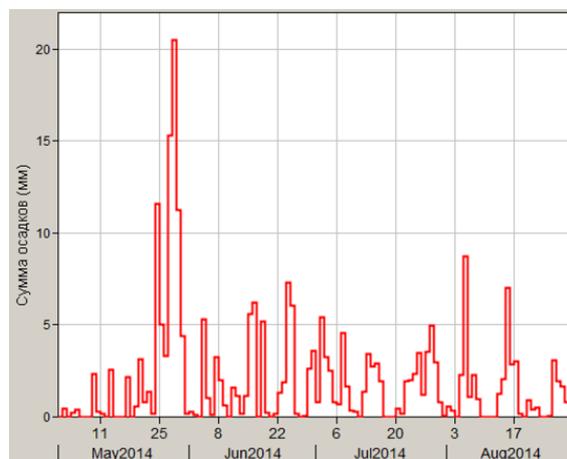
Избыточные осадки, поступающие в каждую ячейку сетки, запаздывают на нормированный временной индекс и накапливаются в линейном резервуаре. Выходные потоки линейных резервуаров ячеек объединяются для получения окончательного гидрографа поверхностного стока подбассейна. Для создания информации о ячейках сетки используется программный модуль НЕС-GeoHMS [14].

Результаты расчетов

Моделирование дождевого стока с водосбора р. Чарыш проведено с использованием метеоданных за период с 1 мая по 31 августа 2014 г., характеризующийся обильными осадками, выпавшими на изучаемой территории. На рисунке 5 показаны диаграммы их распределения за указанный период. В качестве примеров рассматриваются подбассейны W990 (с. Чарышское) и W1140 (с. Усть-Кан) (обозначения подбассейнов – см. рис. 3).



а



б

Рис. 5. Диаграмма распределения осадков:
а – подбассейн W990; б – подбассейн W1140

Используемая модель оценки потерь осадков Deficit and constant loss требует определения четырех параметров: начального дефицита насыщения почвенного слоя (мм) – количества доступной емкости для хранения воды в слое почвы в начале моделирования (1); максимального дефицита (мм) – максимального количества воды, которое может удерживать слой почвы (2); постоянных потерь стока (мм/час) – скорости инфильтрации влаги в почвенном слое (3); доли непроницаемых поверхностей (% покрытия) – процента площади подбассейна, покрытой непроницаемыми поверхностями (4).

Информация о начальном состоянии почвенного слоя (параметр 1) при моделировании неизвестна, поэтому рассмотрены два предельных случая: начальный дефицит насыщения равен нулю, и начальный дефицит насыщения равен максимальному дефициту (рис. 6).

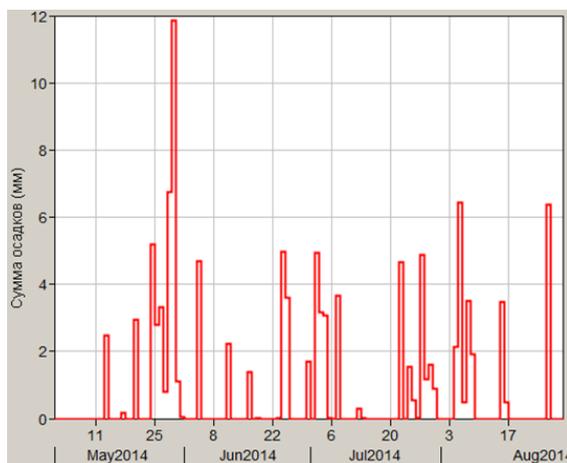
Максимальный дефицит определяет максимальное количество воды, которое

может удерживаться в слое почвы. Верхний предел значения этого параметра может быть установлен, если известна активная глубина почвы и ее пористость. Активная глубина почвы принимается равной полной глубине корневой зоны [16, 27]. Для большей части почв бассейна глубина корневой зоны больше 80 см, коэффициент пористости принят равным 0,3, тогда максимальный дефицит, оцениваемый как

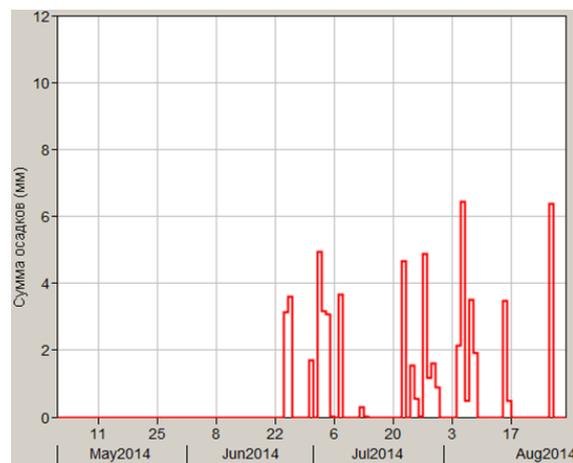
$$def_{max} = 0,5 \times h_{root} \times por,$$

где def_{max} – максимальный дефицит насыщения почвенного слоя (мм), h_{root} – глубина корневой зоны (мм), por – коэффициент пористости [27] – принят равным 120 мм.

Скорость инфильтрации для подбассейнов определена по карте средних минимальных коэффициентов инфильтрации (рис. 3б). Как правило, за пределами крупных городов бассейны рек не имеют значительной водонепроницаемой территории, поэтому в расчетах доля непроницаемых поверхностей принята равной нулю.



а



б

Рис. 6. Оценка влияния параметра начального дефицита насыщения почвенного слоя на избыток осадков (подбассейн W990):

а – начальный дефицит равен 0; б – начальный дефицит равен максимальному дефициту.

Как следует из рисунка 6, параметр начального дефицита оказывает суще-

ственное влияние на количество осадков, впитавшихся и, соответственно, не впитавшихся в почву.

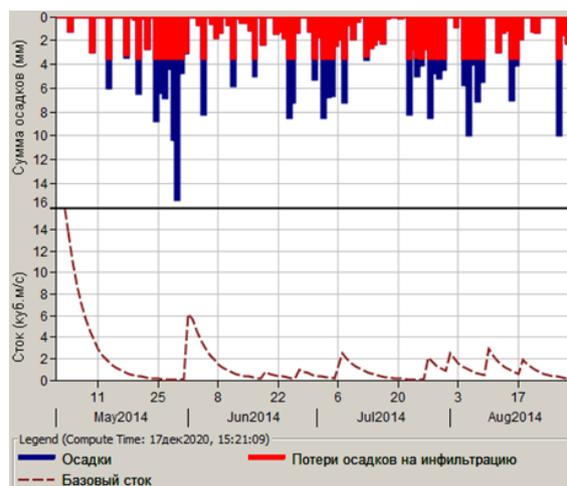
Модель расчета базисного стока

Используемая модель базисного стока Exponential Recession Model требует определения начального стока (Q_0) и коэффициента рецессии (k). В качестве начального значения стока задается минимальный многолетний расход в русле или среднегодовалый модуль

стока (рис.7). Коэффициент рецессии k для природных водосборов с площадью 300-16000 км² изменяется в пределах (0,3-0,8); при этом для водосборов с большей площадью значение k принимается по верхней границе указанного диапазона [28–29].



а



б

Рис. 7. Оценка влияния параметра начального стока на базисный сток (W990):
а – $Q_0 = 2,25 \text{ м}^3/\text{с}$; б – $Q_0 = 21,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Как следует из рисунка 7, влияние параметра Q_0 заметно только на начальном этапе расчета. Два других параметра модели оказывают большее влияние на объем базисного стока, поэтому их значение должно быть уточнено в процессе калибровки.

Модель трансформации осадков в поверхностный сток использует два параметра: время концентрации (T_c) и время накопления в линейном резервуаре (S) для каждого подбассейна, где T_c – время, необходимое для добегания воды от гидравлически наиболее удаленного участка водосбора до расчетной точки [30]. T_c определяется с использованием морфометрических характеристик подбассейнов по эмпирической формуле:

$$T_c = 0,0195L^{0,77}S^{-0,385},$$

где L – длина водотока в подбассейне, средний уклон этого водотока [31]. Время накопления (S) определено из отношения:

$$S/(S + T_c) = 0,6,$$

где значение 0,6 выбрано по аналогии с [32]. Рассчитанные значения T_c и S рассматриваются как начальные приближения для поиска оптимальных значений параметров. На рисунке 8 отображены все рассчитанные компоненты поверхностного стока на примере подбассейна W990.



Рис. 8. Комплексный график элементов поверхностного стока (W990)

Выводы

В статье рассмотрено использование программного комплекса HEC-HMS для расчета дождевого стока в бассейне р. Чарыш. Расчет проводился в несколько этапов:

1. Построен гидрологический граф бассейна. С использованием цифровой модели рельефа бассейн реки представлен в виде системы связанных подбассейнов. Для каждого подбассейна определены морфометрические и гидрологические характеристики, являющиеся входными данными для компьютерной гидрологической модели программного комплекса HEC-HMS.

2. На основе почвенной базы данных Harmonized World Soil Database и почвенной карты Алтайского края получена карта средних коэффициентов инфильтрации.

3. С использованием набор данных PERSIANN-CDR подготовлена информация о пространственном распределении суточных осадков за период с 1 мая по 31 августа 2014 г.

4. На основе моделей расчета базисного стока, модели потерь осадков и модели трансформации осадков в поверхностный сток проведен расчет поверхностного и базисного стока для каждого подбассейна бассейна р. Чарыш.

Обоснован выбор расчетных схем и начальных значений параметров моделей. Определена чувствительность моделей к изменению начальных значений входных параметров.

Следует отметить, что в дальнейших исследованиях полученные результаты расчетов будут верифицированы по натурным гидрографам в замыкающем и промежуточном створах. Рассмотренные модели с верифицированными значениями входных параметров будут использованы для прогнозирования речного стока при различной интенсивности и продолжительности выпадения дождевых осадков, а также для расчета стока загрязняющих веществ с водосбора.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект АААА-А17-117041210241-4)

Список литературы

1. Бефани Н.Ф. Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально общих зависимостей. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 183 с.
2. Чеботарев Н.П. Сток и гидрологические расчеты. – Гидрометеиздат, 2012. – 319 с.
3. Демидов В.Н. Численное моделирование процессов формирования дождевого стока: автореферат дис... докт. физ.-мат. наук. – М.: ИВП РАН, 2007. – 35 с.
4. Коробкова Г.В. Анализ дождевого стока. – Л.: Наука, 1990. – 128 с.
5. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 312 с.
6. Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). – М.: ИВП РАН, 2008. – 394 с.
7. Калюжный И.Л. Лавров С.А. Гидрофизические процессы на водосборе: Экспериментальные исследования и моделирование. – СПб: Нестор-История, 2012. – 615 с.
8. Бочевар Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов. – М.: Недра, 1965. – 306 с.
9. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. – М.: ИВП РАН, 2018. – 296 с.
10. Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) User Guide: Version 4.2. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. U.S. Army Corps of Engineers. – 2016 [Data Portal]. – URL: https://www.hec.usace.army.mil/software/hechhms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.2.pdf.
11. Filimonov V.Yu., Baldakov N.A., Kudishin A.V., Lovtskaya O.V. Analysis of snow reserves dependence on spring flood runoff (large tributaries of the Upper Ob as a case study) // Eurasian journal of mathematical and computer applications. – 2018. – Vol. 6. – Is. 1. – P. 21–31. DOI: 10.32523/2306-6172-2018-6-1-21-31.
12. Ресурсы поверхностных вод районов освоения целинных и залежных земель. Вып. VI. Равнинные районы Алтайского края и южная часть Новосибирской области. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 977 с.
13. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1. Горный Алтай и Верхний Иртыш. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 216 с.
14. HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension User's Manual Version 10.1 Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. U.S. Army Corps of Engineers – 2013 [Data Portal]. – URL: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/documentation/HEC-GeoHMS_Users_Manual_10.1.pdf.
15. СТО ГГИ 52.08.40-2017. Определение морфометрических характеристик водных объектов суши и их водосборов с использованием технологии географических информационных систем по цифровым картам Российской Федерации и спутниковым снимкам / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). – СПб: ООО «РПЦ Офорт», 2017. – 148 с.
16. Почвенная база данных Harmonized World Soil Database (HWSD) [Электронный ресурс]. – URL: <https://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database-HTML/>.
17. Алтайский край: Атлас. – М., Барнаул, 1978. – Т. 1. – 222 с.
18. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. – М.: Высшая школа, 1968. – 629 с.
19. Королев В.А. Водопроницаемость грунтов // Российская геологическая энциклопедия. Т.1. – М., СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. – С. 211.
20. Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с.

21. Крамаренко В.В. Грунтоведение – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 431 с.
22. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 356 с.
23. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений. – Пермь: Изд-во ПНГИУ, 2017. – 148 с.
24. Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS) [Data Portal]. – URL: <http://chrs.web.uci.edu>.
25. Nguyen P., Shearer E., Tran H., Ombadi M., Hayatbini N., Palacios T., Huynh P., Braithwaite D., Updegraff G., Hsu K., Kuligowski B., Logan W., Sorooshian S. The CHRS Data Portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. *Sci Data*. 2019 Jan 8; 6:180296. DOI: 10.1038/sdata.2018.296.
26. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, hydrologic Engineering Center, 2000 [Data Portal]. – URL: [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_\(CPD-74B\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf).
27. Cunderlik, J., Simonovic, S. Calibration, verification, and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrologic model CFCAS project: Assessment of Water Resources Risk and Vulnerability to Changing Climatic Conditions Project Report IV [Data Portal]. – URL: <https://www.eng.uwo.ca/research/iclr/fids/publications/cfcas-climate/reports/report%20IV.pdf>.
28. Handbook of hydrology / D.R. Maidment, ed. – New York: McGraw-Hill, 1992. – 1143 p.
29. Bedient P., Huber W., Vieux B. Hydrology and Floodplain Analysis. – Hardcover, 2015. – 816 p.
30. McCuen R. Hydrologic analysis and design. – Department of Civil Engineering, University of Maryland. – New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1998. – 814 p.
31. Patra K. C. Hydrology and Water Resources Engineering. – New Delhi: Narosa Publishing House, 2008. – 580 p.
32. Kilduff J., Daviero J., Ruswick K. Development of regional unit hydrographs for application to ungagged watersheds in New York. – N.-Y.: Rensselaer Polytechnic Institute, 2014. – 52 p.

References

1. Befani N.F. Prognozirovanie dozhdevykh pavodkov na osnove territorial'no obshchih zavisimostej. – L.: Gidrometeoizdat, 1977. – 183 s.
2. Chebotarev N.P. Stok i gidrologicheskie raschety. – Gidrometeoizdat, 2012. – 319 s.
3. Demidov V.N. CHislennoe modelirovanie processov formirovaniya dozhdevogo stoka: avtoreferat dis... dokt. fiz. - mat. nauk. – M.: IVP RAN, 2007. – 35 s.
4. Korobkova G.V. Analiz dozhdevogo stoka. – L.: Nauka, 1990. – 128 s.
5. Vinogradov Yu.B. Matematicheskoe modelirovanie processov formirovaniya stoka. – L.: Gidrometeoizdat, 1988. – 312 s.
6. Kuchment L.S. Rechnoj stok (genезis, modelirovanie, predvychislenie). – M.: IVP RAN, 2008. – 394 s.
7. Kalyuzhnyj I.L. Lavrov S.A. Gidrofizicheskie processy na vodosbore: Eksperimental'nye issledovaniya i modelirovanie. – SPb: Nestor-Istoriya, 2012. – 615 s.
8. Bochevar F.M., Garmonov I.V., Lebedev A.V., Shestakov V.M. Osnovy gidrogeologicheskikh raschetov. – M.: Nedra, 1965. – 306 s.
9. Motovilov YU.G., Gel'fan A.N. Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnykh bassejnov. – M.: IVP RAN, 2018. – 296 s.

10. Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) User Guide: Version 4.2. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. U.S. Army Corps of Engineers. – 2016 [Data Portal]. – URL: https://www.hec.usace.army.mil/software/hechhms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.2.pdf.
11. Filimonov V.Yu., Baldakov N.A., Kudishin A.V., Lovtskaya O.V. Analysis of snow reserves dependence on spring flood runoff (large tributaries of the Upper Ob as a case study) // Eurasian journal of mathematical and computer applications. – 2018. – Vol. 6. – Is. 1. – P. 21–31. DOI: 10.32523/2306-6172-2018-6-1-21-31.
12. Resursy poverhnostnyh vod rajonov osvoeniya celinnyh i zaleznyh zemel'. Vyp. VI. Ravninnye rajony Altajskogo kraja i yuzhnaya chast' Novosibirskoj oblasti. – L.: Gidrometeoizdat, 1962. – 977 s.
13. Resursy poverhnostnyh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost'. T. 15. Altaj i Zapadnaya Sibir'. Vyp. 1. Gornyj Altaj i Verhnij Irtysh. – L.: Gidrometeoizdat, 1966. – 216 s.
14. HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension User's Manual Version 10.1 Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. U.S. Army Corps of Engineers – 2013 [Data Portal]. – URL: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/documentation/HEC-GeoHMS_Users_Manual_10.1.pdf.
15. STO GGI 52.08.40-2017. Opredelenie morfometricheskikh harakteristik vodnyh ob'ektov sushi i ih vodosborov s ispol'zovaniem tekhnologii geograficheskikh informacionnyh sistem po cifrovym kartam Rossijskoj Federacii i sputnikovym snimkam / Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy (Rosgidromet). – SPb: OOO «RPC Ofort», 2017. – 148 s.
16. Pochvennaya baza dannyh Harmonized World Soil Database (HWSD) [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database-HTML/>.
17. Altajskij kraj: Atlas. – M., Barnaul, 1978. – T. 1. – 222 s.
18. Maslov N.N. Osnovy mekhaniki gruntov i inzhenernoj geologii. – M.: Vysshaya shkola, 1968. – 629 s.
19. Korolev V.A. Vodopronicaemost' gruntov // Rossijskaya geologicheskaya enciklopediya. T.1. – M., SPb.: Izd-vo VSEGEI, 2010. – S. 211.
20. Gruntovedenie / Pod red. V.T. Trofimova. – M.: Izd-vo MGU, 2005. – 1024 s.
21. Kramarenko V.V. Gruntovedenie – Tomsk: Izd-vo TPU, 2011. – 431 s.
22. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 1. – L.: Gidrometeoizdat, 1989. – 356 s.
23. P'yankov S.V., Shihov A.N. Geoinformacionnoe obespechenie modelirovaniya gidrologicheskikh processov i yavlenij. – Perm': Izd-to PGNIU, 2017. – 148 s.
24. Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS) [Data Portal]. – URL: <http://chrs.web.uci.edu>.
25. Nguyen P., Shearer E., Tran H., Ombadi M., Hayatbini N., Palacios T., Huynh P., Braithwaite D., Updegraff G., Hsu K., Kuligowski B., Logan W., Sorooshian S. The CHRS Data Portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. *Sci Data*. 2019 Jan 8; 6:180296. DOI: 10.1038/sdata.2018.296.
26. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, hydrologic Engineering Center, 2000 [Data Portal]. – URL: [https://www.hec.usace.army.mil/software/hechhms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_\(CPD-74B\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hechhms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf).
27. Cunderlik, J., Simonovic, S. Calibration, verification, and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrologic model CFCAS project: Assessment of Water Resources Risk and Vulnerability to Changing Climatic Conditions Project Report IV [Data Portal]. – URL:

<https://www.eng.uwo.ca/research/iclr/fids/publications/cfcas-climate/reports/report-%20IV.pdf>.

28. Handbook of hydrology / D.R. Maidment, ed. – New York: McGraw-Hill, 1992. – 1143 p.
29. Bedient P., Huber W., Vieux B. Hydrology and Floodplain Analysis. – Hardcover, 2015. – 816 p.
30. McCuen R. Hydrologic analysis and design. – Department of Civil Engineering, University of Maryland. – New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River, 1998. – 814 p.
31. Patra K. C. Hydrology and Water Resources Engineering. – New Delhi: Narosa Publishing House, 2008. – 580 p.
32. Kilduff J., Daviero J., Ruswick K. Development of regional unit hydrographs for application to ungagged watersheds in New York. – N.-Y.: Rensselaer Polytechnic Institute, 2014. – 52 p.

HEC-HMS BASED SIMULATION OF RUNOFF IN CHARYSH RIVER BASIN

V.Yu. Filimonov, O.V. Lovtskaya, A.B. Golubeva

Institute for Water and Environmental Problems of the SB RAS, Barnaul, E-mail: lov@iwep.ru

The paper presents the calculation results of rainfall runoff in the Charysh River basin during the summer low water period using the HEC-HMS software package. The digital elevation model of river basin was employed to construct the system of subbasins, to define the centers of gravity and drainage lines for each sub-basin, to build the hydrological basin graph and to calculate the morphometric characteristics of its components. The Harmonized World Soil Database and the soil map of Altai Krai were employed for constructing a map of soil texture of the Charysh River basin. To define precipitation amount at the catchment, we used the Persiann-CDR dataset. The separation of hydrograph components was implemented for the Charysh River during the rainfall period.

Keywords: Charysh River basin, hydrological basin graph, rainfall runoff formation, separation of hydrograph components, HEC-HMS software package application.

Received January 18, 2021