Исследование лесогидрологических процессов на водосборах рек бассейна Амура по данным спутниковых и гидрометеорологических наблюдений

А. Л. Верхотуров[1], Г. В. Соколова[2], С. А. Барталев[3], Л. С. Крамарева[4]

[1] *Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия*
E-mail: andrey@ccfebras.ru

[2] *Институт водных и экологических проблем ДВО РАН*
Хабаровск, 680000, Россия
E-mail: pozhar@ivep.as.khb.ru

[3] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: bartalev@smis.iki.rssi.ru

[4] *Дальневосточный центр «НИЦ «Планета», Хабаровск, 680000, Россия*
E-mail: kramareva@dvrcpod.ru

Водосборный бассейн реки (водосбор) представляет собой замкнутую экосистему, в которой роль леса неразрывно связана с гидрологическими процессами. Лесогидрологами общепризнанно, что благодаря «разрыхляющему» действию корневой системы древостоя увеличивается пористость почвогрунтов, уменьшается промерзание почв, возрастают их инфильтрационные возможности. Почва интенсивнее «поглощает» атмосферные осадки в данных условиях, способствуя в результате повышения водопроницаемости уменьшению поверхностного склонового стока в русла рек. Однако в настоящее время влияние покрытой лесом территории водосбора на речной сток исследовано недостаточно и строгой функциональной зависимости между этими факторами ещё не установлено. Это относится и к водосборам рек бассейна Амура, начало изучению которых было положено в середине XX в. Современные возможности методов дистанционного зондирования Земли из космоса по картированию растительного покрова на территории России позволяют продолжить и развить ранее начатые исследования с целью установления тенденций влияния на сток ежегодной изменчивости покрытой лесом площади водосбора с учётом различий породной структуры (отдельно хвойных и лиственных) и доли коренных пород и с использованием данных, охватывающих периоды муссонных дождей и паводков в 2000–2016 гг.

В настоящей работе представлены результаты исследования лесогидрологических процессов водосборов рек в бассейне Среднего и Нижнего Амура по данным спутниковых и наземных гидрологических и метеорологических наблюдений за период с 2000 по 2016 г. На примере восьми модельных бассейнов рек (Амгунь, Биджан, Бурея, Большая Бира, Кур, Манома, Нимелен, Тырма) выполнен анализ изменчивости лесопокрытой площади водосборов в динамике с показателями речного стока, максимальными годовыми расходами и уровнями воды, метеорологическими показателями (температура, осадки).

Ключевые слова: бассейн Амура, лесогидрологические процессы, водосбор, речной сток, гидрологический режим, цифровая модель рельефа, данные дистанционного зондирования

Одобрена к печати: 30.07.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-142-154

Введение

В настоящее время известно множество исследований зарубежных и российских авторов по оценке влияния лесистости водосборов на гидрологический режим рек (Крестовский, 1986; Широкова, 1983; Bonell, 1998; Jones, Post, 2004; Swank et al., 1998). Анализ многочисленных попыток провести такую оценку показывает, что гидрологическая роль леса является значительной в процессе влагооборота, который может по-разному функционировать в различных географических и климатических условиях. Проведённые исследования (Jones, Post, 2004) по данным многолетних наблюдений на 14 парах небольших водосборов (порядка 100 га), расположенных в северо-западной и восточной частях США, показали, что после вырубки

лиственного леса в течение первых пяти лет величина суточного стока с водосбора увеличивается в среднем на 2–3 мм, а после вырубки хвойного леса — на 6–8 мм. Зависимость суточного стока малых рек от вырубки лиственного леса малых речных водосборов была выявлена ранее на основе многолетних лесогидрологических наблюдений на территории о. Сахалин (Клинцов, 1973). В 1980-х гг. впервые для лесной гидрологии были опубликованы результаты исследований на крупном речном водосборе (41 000 км^2) (Широкова, 1983), которые показали, что лесогидрологические величины могут значительно меняться и даже принимать отрицательные значения в зависимости от возраста и типа леса, климатических условий и строения водосбора.

На территории бассейна реки Амур систематические исследования лесогидрологических процессов проводились лишь в 1950–1960-х гг. В тот период времени леса занимали 70–85 % территории (Ресурсы..., 1966, 1970), а лесистость отдельных водосборов достигала 90–100 %. При этом исследования базировались на полевых материалах лесоустройства и данных сетевых наблюдений по речному стоку и метеорологическим параметрам. Однако далеко не на всех территориях бассейнов рек выполнялись лесоустроительные работы, результаты которых можно было связать с режимом рек, а иных видов наблюдений (например, спутниковых) за состоянием леса на тот момент не было.

За последние 60 лет произошли существенные изменения растительного покрова, на который оказали влияние различные природные и антропогенные факторы (лесные пожары, вырубки и т.п.), что, безусловно, требует проведения комплексных исследований лесогидрологических процессов в этом регионе. Появление новых видов данных, получаемых системами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяет применить эффективные методы картографирования растительного покрова для исследования таких процессов. В настоящей статье представлены первые результаты работ по изучению изменения растительного покрова и его влияния на гидрологический режим водосборов рек бассейна Среднего и Нижнего Амура за период 2000–2016 гг.

Методика построения водосбора рек

В качестве объектов исследования были выбраны следующие водосборы рек в бассейне Среднего и Нижнего Амура: Амгунь, Биджан, Бурея (выше Бурейского водохранилища), Большая Бира, Кур, Манома, Нимелен и Тырма, где с 1950-х гг. леса наиболее часто подвергались воздействию пожаров и рубок (Данилин, 2009; Соловьев, 1958; Sokolova, Makogonov, 2013) и по которым есть непрерывные серии наземных гидрологических наблюдений. С целью выделения пространственных границ бассейнов рек с использованием высотных данных рельефа SRTM Void Filled (Farr et al., 2007; https://lta.cr.usgs.gov/SRTMVF), геоинформационной системы (ГИС) GRASS GIS, данных по гидрологическим постам (Государственный..., 1997) и с помощью алгоритма, основанного на модели восьминаправленного стока D8 (Jenson, Domingue, 1988), были проведены следующие работы:

1. Обработаны входные данные SRTM Void Filled для заполнения локальных понижений (или пиков), которые практически всегда присутствуют в цифровой модели рельефа (ЦМР), препятствующих прохождению потока воды и влияющих на дренажную сеть, которая может иметь разрывы. Этот процесс выполнялся до тех пор, пока не были заполнены все локальные понижения заданной глубины (не более 100 м).

2. Для каждого пикселя растрового изображения определено направление потока, в котором вода будет вытекать из соответствующего пикселю участка. Для всех крайних пикселей задавалось направление потока наружу, так как исследовалась внутренняя часть растрового изображения. Вычислялось максимальное из взвешенных расстояний значений высот (из ЦМР) для каждого из восьми соседних пикселей и по ним — направление потока: $D_{0i} = (z_0 - z_i)/d_{0i}$ где D_{0i} — взвешенное расстояние; z_0 — значение высоты вычисляемого пикселя; z_i — значение высоты одного из соседних пикселей; d_{0i} — расстояние между центрами пикселей. Каждый пиксель кодировался одним из направлений относительно соседних пикселей (*рис. 1*).

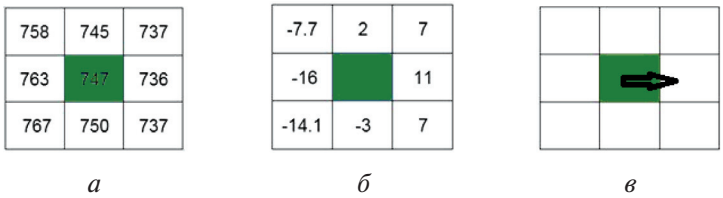

Рис. 1. Вычисление направления потока из каждого пикселя: *а* — значения из ЦМР; *б* — расчёт взвешенного расстояния соседних пикселей; *в* — направление потока

3. С использованием набора данных о направлениях стока рассчитан суммарный сток, где каждому пикселю присвоено значение, равное количеству пикселей, «впадающих» в данный. Пиксели, имеющие значения, равные нулю (в которые не «втекает» ни один пиксель), в общем случае соответствуют горным хребтам или линиям водораздела.

4. По данным суммарного стока вычислено значение количества пикселей вверх по склону, «впадающих» в каждый пиксель. Создано растровое изображение, в котором пикселям присваивалось значение 1, если в них осуществлялся сток больше заранее заданного значения (не менее 100 пикселей).

5. На этом этапе было необходимо, чтобы точка с координатами гидропоста находилась на водотоке (на пикселе растрового изображения сети водотоков со значением 1). Это обязательное условие, иначе выделение водосборной области не представляется возможным.

6. Этап выделения водосбора осуществлялся по данным направления потока, суммарного стока, сети водотока и точки расположения гидропоста.

Классификация типов растительности на водосборах

В качестве источника информации о лесистости и породной структуре лесов территории исследуемых водосборных бассейнов использовался временной ряд карт растительного покрова России пространственного разрешения 250 м, полученных по данным спутниковой системы ДЗЗ Terra-MODIS (Барталев и др., 2011). Метод картографирования растительного покрова включал в себя предварительную обработку временных рядов данных MODIS, направленную на снижение влияния мешающих факторов (облака и образуемые ими тени, сезонный снежный покров и аппаратные шумы), а также последующую классификацию различных типов лесов и других классов земного покрова с использованием алгоритма локально-адаптивной классификации LAGMA (Locally Adaptive Global Mapping Algorithm) (Bartalev et al., 2014). В основе алгоритма LAGMA лежит принцип пространственной локализации процессов обучения классификатора и распознавания типов земного покрова. Использование алгоритма позволяет обеспечить адаптивность классификатора к пространственным изменениям физико-географических условий, удовлетворяя одно из требований, предъявляемых к методам обработки спутниковых данных для больших территорий. Временной ряд созданных к настоящему времени карт типов растительного покрова России (Барталев и др., 2016) охватывает период 2000–2016 гг. и ежегодно дополняется по мере сбора и обработки спутниковых данных. Легенда карты включает в себя 23 тематических класса, 18 из которых характеризуют различные типы растительности, выделенные с учётом их жизненных форм, типов вегетативных органов и фенологической динамики. В настоящее время эта карта является наиболее детальным в пространственном и тематическом отношениях источником информации о типах растительного покрова России, полученным на всю территорию страны на основе данных ДЗЗ. При этом необходимо учитывать, что процесс построения карты автоматизирован, что обеспечивает полную повторяемость получаемых результатов и позволяет проводить ежегодное картографирование растительного покрова в масштабах страны.

Результаты обработки данных ДЗЗ позволяют нам, с одной стороны, иметь непрерывный ряд наблюдений за состоянием растительного покрова, с другой — обеспечивает возможность выделения его структуры (луга, вода, болота, леса: хвойные, смешанные, лиственные

и т.д.). Для всех водосборов за каждый год выбирались данные по следующим лесным формациям: темнохвойные вечнозелёные, светлохвойные вечнозелёные, лиственные, хвойные листопадные (лиственничные) леса, хвойные вечнозелёные кустарники, лиственные кустарники, смешанные леса с преобладанием хвойных, смешанные леса, смешанные леса с преобладанием лиственных, тундра кустарниковая, редины хвойные листопадные (лиственничные), свежие гари.

Обработка данных и результаты

Обработка данных на водосборах рек бассейна Амура проводилась следующим образом. По данным ДЗЗ о лесопокрытой территории производился расчёт площади леса (в целом и отдельно по каждой группе пород) и гарей. Совместно анализировалась временна́я динамика гидрологической и метеорологической информации с целью выявления причин изменчивости показателей стока модельных рек в новых условиях (климат, лесные пожары, рубки) за период исследований 2000–2016 гг. Для изучения динамики стоковых показателей выбраны два лесных водосбора крупных северных рек Амгунь и Бурея, а также водосбор реки Большая Бира (как альтернатива), находящийся в более южных широтах с меньшей площадью бассейна и более тёплыми климатическими условиями (*рис. 2*). По остальным пяти водосборам (Биджан, Кур, Манома, Нимелен, Тырма) анализировались показатели наивысших уровней воды у замыкающего водосбор створа.

Расчёт показателей стока модельных рек за па́водочный период с июля по август каждого года (исключая июнь, когда часто наблюдаются снегодождевые паводки с участием талого стока) позволил выполнить оценку ежегодной изменчивости сезонного стока по гидрологическим характеристикам, включая наивысшие уровни воды у замыкающего водосбор створа. Были рассчитаны следующие показатели:

- модуль па́водочного стока M (л/с·км^2), который отражает стекающее количество воды (в виде среднего расхода воды за рассматриваемый период) с каждого квадратного километра водосбора за 1 с;

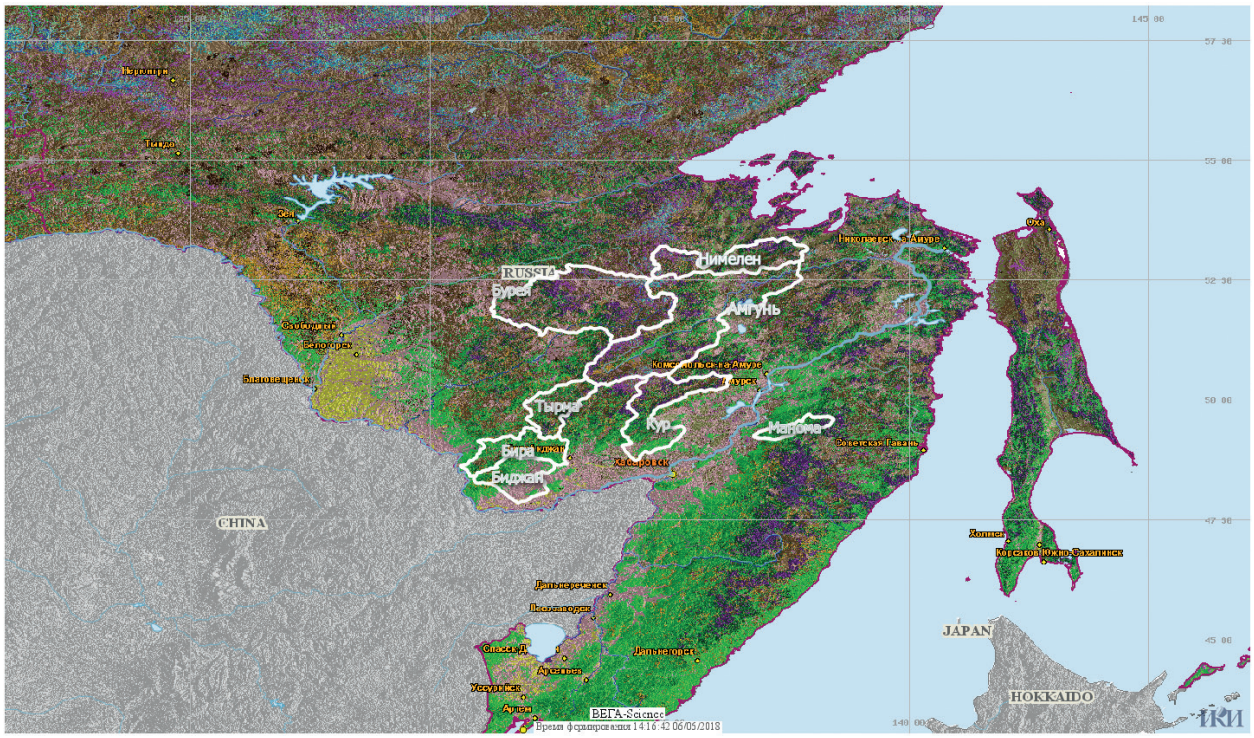

Рис. 2. Территория исследования водосборов рек Среднего и Нижнего Амура

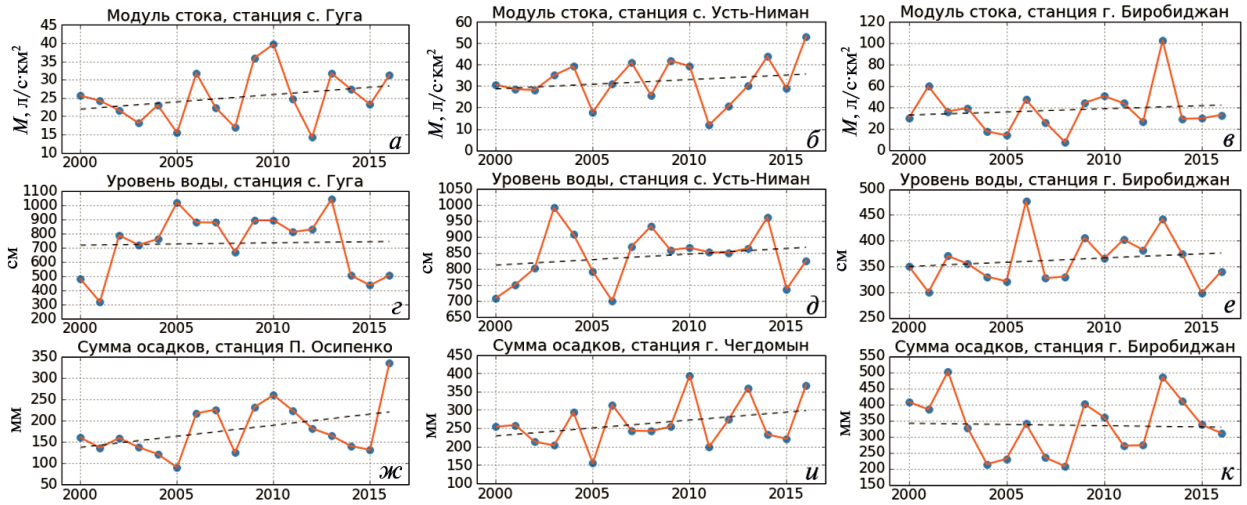

Рис. 3. Динамика модуля речного стока, уровня воды на пике дождевых паводков и суммы осадков на водосборах р. Амгунь (*а*, *г*, *ж*), р. Бурея (*б*, *д*, *и*) и р. Большая Бира (*в*, *е*, *к*) за июль – август 2000–2016 гг.

- коэффициент стока α за период дождевых паводков (июль – август), выражающий отношение величины слоя стока (мм) к количеству выпавших на площадь водосбора атмосферных осадков (мм) за тот же период по данным ближайшей метеостанции;
- наивысшие уровни воды за период дождевых паводков *H* (мм).

Выявлено, что в динамике стоковых показателей и пиков дождевых паводков с 2000 г. прослеживается тенденция увеличения этих характеристик гидрологического режима в соответствии с суммой выпавших осадков (*рис. 3*).

С учётом известной концепции (Широкова, 1983), что речной сток есть интегральный показатель изменчивости стокоформирующих факторов, характеризующих природно-климатические и антропогенные воздействия на речные водосборы, эти факторы были исследованы на предмет влияния на речной сток в период дождевых паводков, из них выделены основные.

Локальные и региональные климаты (температура воздуха, осадки)

Очевидно, что осадки являются главным фактором формирования стока в режиме дождевых паводков. На всех модельных реках со стоковыми показателями динамика суммы осадков за июль – август, по данным восьми метеостанций на территории исследуемых водосборов за 2000–2016 гг., имеет преимущественно положительный тренд, как и для трёх водосборов, представленных на *рис. 2*. Анализ температурного режима за тот же период показал отсутствие пониженного фона температур, который бы мог способствовать в какой-то степени уменьшению испарения влаги и, соответственно, — увеличению поверхностного стока. Температурно-влажностный режим восьми модельных водосборов, как показал сравнительный анализ, хорошо согласуется с ранними исследованиями климатических условий дальневосточной территории (Sokolova, Makogonov, 2013), «вписываясь» в фоновое распределение метеорологических показателей, выявленное по данным 50 станций за 1980–2009 гг. Следует заметить, что дополнительный анализ температурно-влажностного режима по метеостанциям Хабаровского края до 2016 г. не нарушил климатической закономерности, представленной на *рис. 4* (см. с. 147), подтверждая стабильное состояние локальных и региональных климатов.

Влияние климатических факторов отражается и в относительной величине речного стока, выраженной коэффициентом стока α за рассматриваемый период, значение которого в большей степени зависит от суммы осадков, выпавших за тот же период. На основе анализа динамики коэффициентов стока выполнена оценка: какая часть дождевых вод теряется

на инфильтрацию почв водосбора и трансформацию в подземный сток. Так, высокие коэффициенты па́водочного стока северных рек Амгунь и Бурея (соответственно $\alpha = 0{,}8$ и 0,7), средние за 2000–2016 гг., свидетельствуют о малых потерях дождевых вод, стекающих в русла рек. Слабоотрицательный или почти нулевой тренд коэффициентов α северных рек свидетельствует о слабой водопроницаемости почв, что способствует стеканию атмосферных осадков (до 70–80 %) в русла рек и потере дождевых вод при трансформации в подземный сток (*рис. 5а*, *б*).

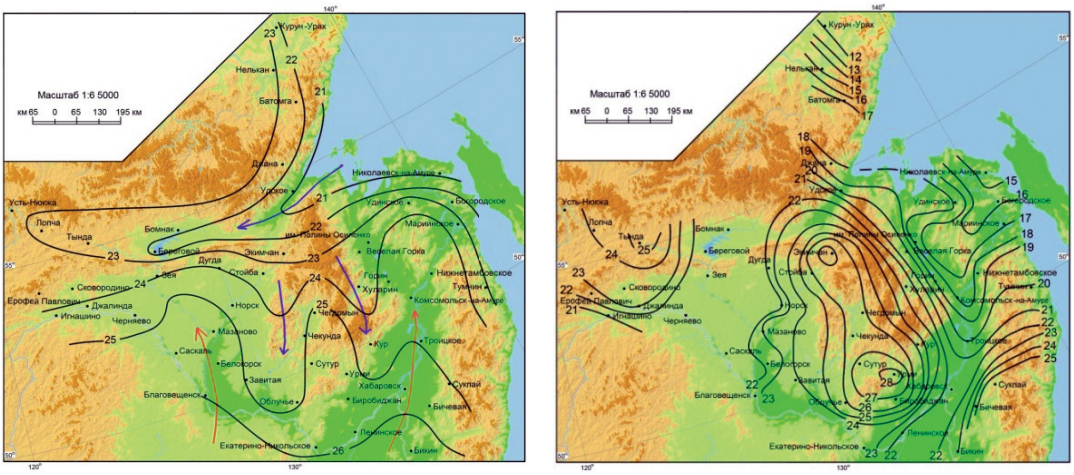

Рис. 4. Изолинии распределения максимальной температуры воздуха, средней за лето (*а*), и суммы дней с осадками более 3 мм/сут за лето (*б*) по данным 50 станций Дальнего Востока за 1980–2009 гг.

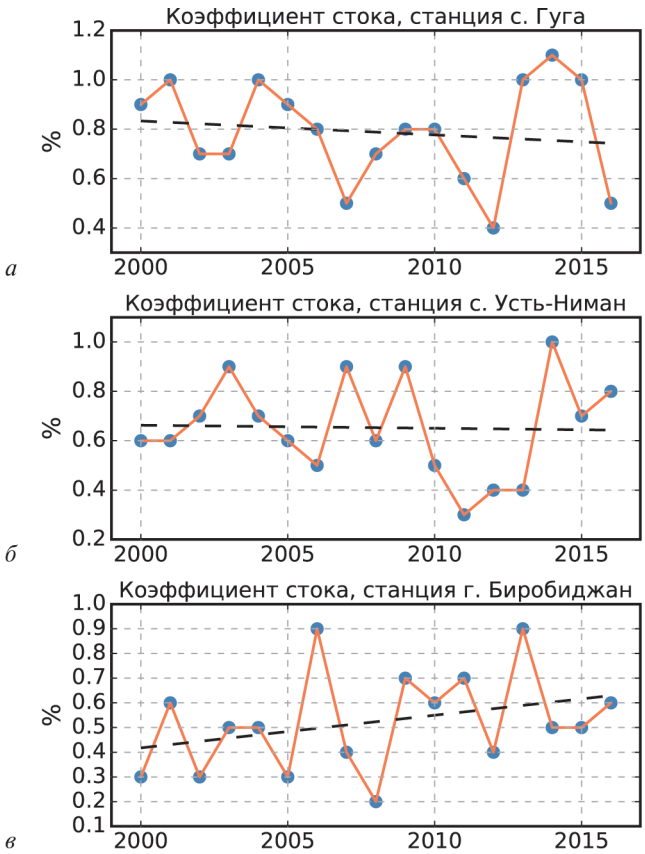

Рис. 5. Динамика коэффициентов па́водочного стока α модельных рек Амгунь (*а*), Бурея (*б*) и Большая Бира (*в*) за июль – август 2000–2016 гг.

Для южной реки Большая Бира величина среднего многолетнего коэффициента уменьшается до 0,5 (*рис. 5в*), однако в гидрологии его принято считать также высоким, так как в степных и полупустынных районах коэффициент α падает даже ниже 0,1. Положительный тренд коэффициентов α па́водочного стока реки Большая Бира указывает на увеличение влагоёмкости почв водосбора с более тёплыми климатическими условиями. Таким образом, зона, где протекают реки северных районов бассейна Амура, продолжает характеризоваться стабильным (с 1960–1980-х гг.) избыточным увлажнением (Широкова, 1983), несмотря на изменчивость глобального климата.

Орография и площади лесов различных пород

Созданию благоприятных условий трансформации атмосферных осадков в па́водочный сток способствует также строение водосбора, т.е. его гидрографические характеристики. Некоторые из них рассмотрены на примере реки Амгунь: построен профиль рельефа водосбора от истока реки до с. Гуга (*рис. 6*), рассчитан уклон профиля, равный 2,5 %, что указывает на оптимальные условия стекания поверхностных скло́новых вод в русло реки.

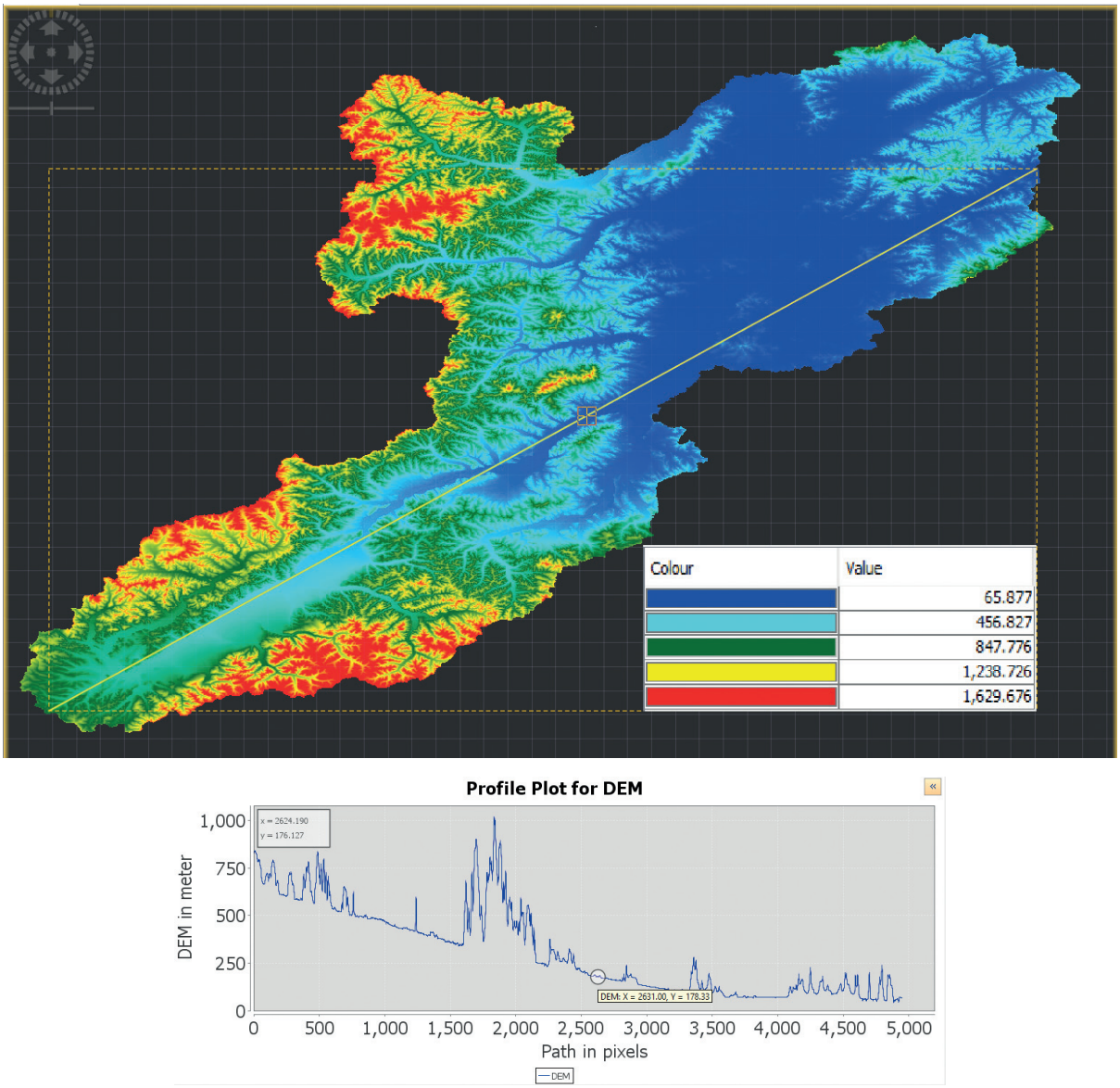

Рис. 6. Профиль рельефа водосбора р. Амгунь от истока до замыкающего гидроствора с. Гуга

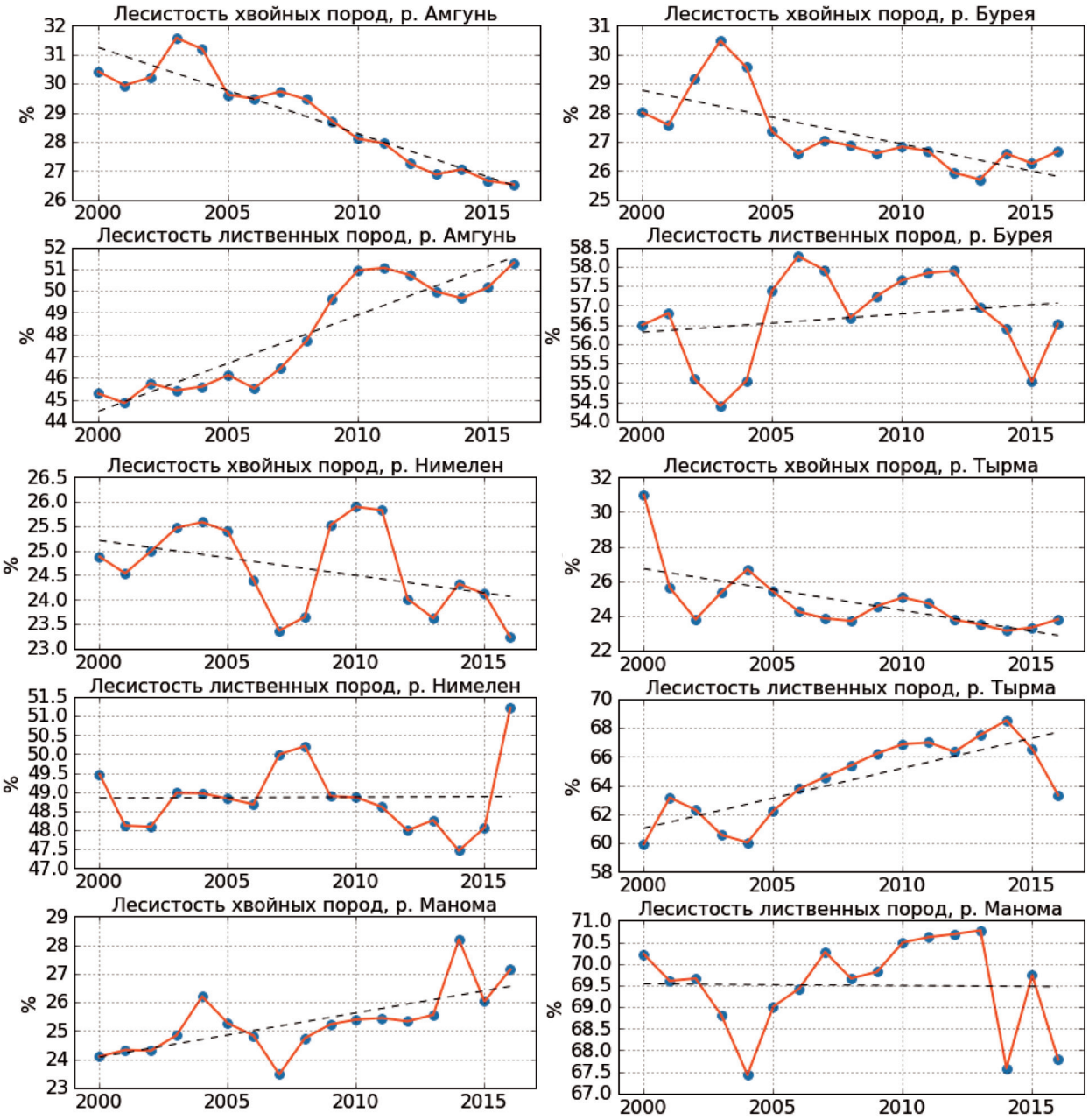

Рис. 7. Динамика лесистости водосборов северных рек по группам древесных пород леса: р. Амгунь с левым притоком р. Нимелен; р. Бурея с левыми притоками р. Тырма, р. Манома

По общепринятой в лесном хозяйстве классификации (Колесников, 1969) данный район исследований относится к зонам хвойных и хвойно-широколиственных лесов. Так, большую часть бассейна Нижнего Амура занимают лиственничники (51,5 %), елово-пихтовые и хвойно-широколиственные леса (36 %) (Широкова, 1983). Исследуемые в этой зоне водосборы имеют высокие показатели общей лесистости — в среднем 80 %, при этом, согласно материалам лесоустройства 1950–1960-х гг. и принятым в лесном хозяйстве методам расчёта лесистости, учитывается весь породный состав леса. Рассчитанная методами ДЗЗ лесистость модельных водосборов за 2000–2016 гг. имеет средний показатель 82,2 %, т. е. превышает на 2,2 % данные лесоустройства 1950–1960-х гг. (Данилин, 2009). Повышению лесистости могло способствовать зарастание гарей и вырубок быстрорастущими берёзовыми и осиновыми (в отличие от хвойных пород) молодняками.

С применением методов ДЗЗ установлена изменчивость общей покрытой лесом площади водосбора за последние 17 лет, а также динамика площади лесов различных групп пород. Так, на фоне тенденции увеличения общей лесистости тренд доли площади лесов коренных пород, которые формируются в характерных для данного водосбора лесорастительных условиях, сохраняет противоположную направленность. Особенно резкое отличие динамики доли площади хвойных пород от лиственных имеют водосборы северных рек и их притоков, где тренды характеризуются почти зеркальной противоположностью (*рис. 7*, см. с. 149).

Лесные пожары и рубки

Динамика общей лесопокрытой площади на всех модельных водосборах преимущественно имеет направленность, противоположную динамике площади свежих гарей, выявляемых по данным ДЗЗ (*рис. 8*). Однако это относится в основном к коренным хвойным породам на водосборе — темнохвойным, светлохвойным и лиственничным лесам, которые более интенсивно горят и в большей степени подвержены рубкам (см. *рис. 7*).

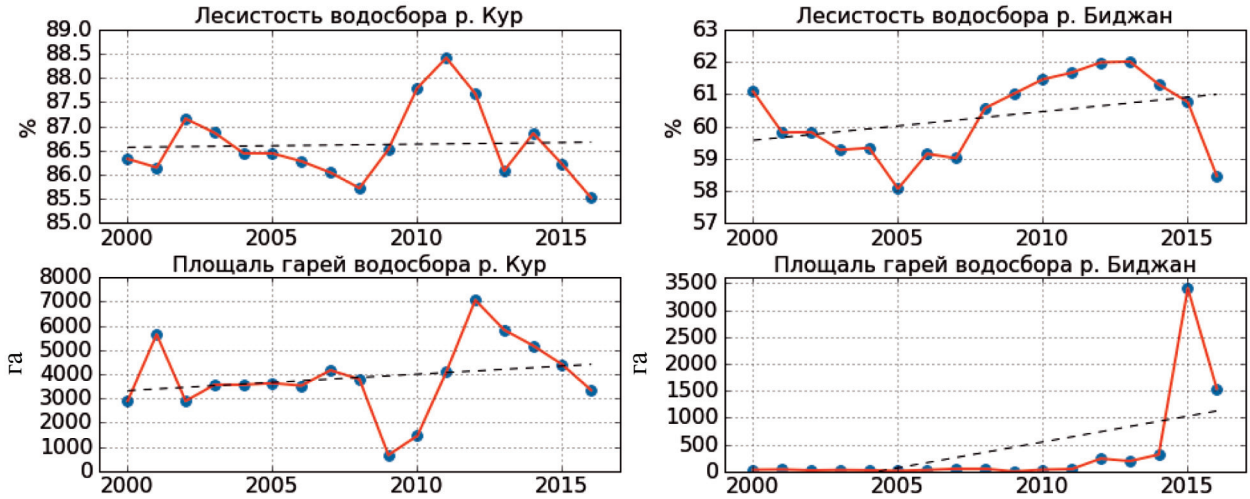

Рис. 8. Динамика лесистости относительно динамики площадей гарей на водосборах рек Кур и Биджан

Выводы

Таким образом, с помощью методов ДЗЗ исследовано состояние водосборов притоков Амура в современных условиях за 2000–2016 гг. (климат, лесистость, пожары, рубки) с целью выявления степени влияния на изменчивость показателей сезонного стока, рассчитанных за период муссонных и фронтальных дождей (июль – август) и имеющих в динамике преобладание положительных трендов. Получены новые факты, способствующие объяснению результатов предшествующих исследований в области лесной гидрологии.

Установлено, что тенденция сокращения площади коренных хвойных пород способствует трансформации осадков в речной сток с меньшими потерями, что согласуется с положительными трендами стоковых показателей в период муссонных дождей и интенсивных фронтальных циклонов. Есть основание предполагать, что такая тенденция сохранится на долговременную перспективу, так как хвойные деревья в большей степени подвержены воздействию пожаров и рубок с последующим более продолжительным (по сравнению с лиственными породами) периодом восстановления.

Высокие коэффициенты па́водочного стока модельных рек (от 0,50 до 0,70–0,80), рассчитанные за последние 17 лет, указывают на характерную особенность водно-физических

свойств почвенного покрова в зоне хвойных и хвойно-широколиственных лесов: пониженную инфильтрацию в период муссонных и фронтальных дождей, когда потеря склонового стока в русла северных рек составляет всего 20–30 %, а южных рек (Большая Бира, Манома) — 50 %. Свой вклад в уменьшение влагоёмкости почв под пóлогом леса водосборов вносят хвойные породы, площадь которых уменьшается из-за обширных пожаров и рубок.

В связи с тем что, по мнению большинства лесогидрологов, влияние общей лесистости территории на речной сток до настоящего времени окончательно не выяснено, можно сделать вывод, что при оценке лесного покрова водосбора как фактора влияния на речной сток следует учитывать отдельно долю площади хвойных и лиственных пород. Целесообразность получения такого рода оценок объясняется тем, что разные типы леса имеют разную корневую систему, разрыхляющую лесную почву, способствуя частичной потере атмосферных осадков и трансформации их в подземный сток. При таком разделении учитывается и тот факт, что при изреживании густого хвоистого пóлога, имеющего большую поверхность соприкосновения с жидкими осадками, последние проникают в почву в более полном объёме, а с исчезновением более глубокой корневой системы хвойных пород замедляется потеря дождевых вод на инфильтрацию.

Следует отметить, что ведутся комплексные исследования по оценке влияния лесов не только на речной сток, но и на региональные метеорологические условия, что подчёркивает важность учёта современной лесистости территории. Так, согласно результатам исследования (Kuzmina et al., 2017), изменение степени облесённости территории может привести к существенным изменениям приземной температуры и полей осадков. Влияние изменения лесистости на режим осадков, в отличие от температуры, оказалось, по мнению вышеуказанных авторов, более сложным, причём не только за отдельные дни, но и при суммировании за весь летний период. Другие лесорастительные процессы, такие как зарастание вырубленных участков древесным подростом (сукцессионная смена растительных сообществ на вырубках), могут также оказать определённое влияние на региональные метеорологические поля.

Обработка данных дистанционного зондирования для картографирования растительного покрова и оценки лесистости исследуемых водосборных бассейнов выполнялась с использованием Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений Института космических исследований Российской академии наук (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») (Лупян и др., 2015).

При обработке данных были использованы ресурсы Центра коллективного пользования «Центр данных ДВО РАН» (Sorokin et al., 2017).

Литература

1. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Ершов Д. В.*, *Исаев А. С.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Уваров И. А.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
2. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Жарко В. О.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.*, *Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. Государственный водный кадастр. Раздел 1. Поверхностные воды. Серия 2. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши 1993 г. Часть 1. Вып. 19. Бассейны Амура (без бассейнов Шилки, Аргуни, Уссури, Амазара) и Уды. СПб: Гидрометеоиздат, 1997.
4. *Данилин А. К.* Лесоустройство Дальнего Востока. Хабаровск: Издательская группа «Наше время», 2009. 335 с.
5. *Клинцов А. П.* Защитная роль лесов Сахалина. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 1973. 233 с.
6. *Колесников Б. П.* Лесохозяйственные области таежной зоны СССР и системы лесного хозяйства в аспекте долгосрочных прогнозов // Информ. бюлл. Научного совета по комплексному освоению таежных территорий. Иркутск: Изд-во Ин-та географии Сибири, 1969. № 2. С. 9–40.

7. *Крестовский О.И.* Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 117 с.
8. *Лупян Е.А.*, *Прошин А.А.*, *Бурцев М.А.*, *Балашов И.В.*, *Барталев С.А.*, *Ефремов В.Ю.*, *Кашницкий А.В.*, *Мазуров А.А.*, *Матвеев А.М.*, *Суднева О.А.*, *Сычугов И.Г.*, *Толпин В.А.*, *Уваров И.А.* Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
9. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 1. Верхний и Средний Амур. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1966. 781 с.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 2. Нижний Амур. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. 592 с.
11. *Соловьев К.П.* Кедрово-широколиственные леса Дальнего Востока и хозяйство в них. Хабаровск: Хабаровское книжное изд-во, 1958. 367 с.
12. *Широкова М.Р.* Зависимость стока рек муссонного климата от физико-географических факторов в Нижнем Приамурье // Формирование природных вод Дальнего Востока. Владивосток: Дальневосточный науч. центр, АН СССР, 1983. С. 43–55.
13. *Bartalev S.A.*, *Egorov V.A.*, *Loupian E.A.*, *Khvostikov S.A.* A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. V. 5. Iss. 1. P. 55–64.
14. *Bonell M.* Possible Impacts of Climate Variability and Change on Tropical Forest Hydrology // Climatic Change. 1998. V. 39. Iss. 2. P. 215–272.
15. *Farr T.G.*, *Rosen P.A.*, *Caro E.*, *Crippen R.*, *Duren R.*, *Hensley S.*, *Kobrick M.*, *Paller M.*, *Rodriguez E.*, *Roth L.*, *Seal D.*, *Shaffer S.*, *Shimada J.*, *Umland J.*, *Werner M.*, *Oskin M.*, *Burbank D.*, *Alsdorf D.* The shuttle radar topography mission // Reviews of Geophysics. 2007. V. 45. RG2004. DOI: 10.1029/2005RG000183.
16. *Jenson S.K.*, *Domingue J.O.* Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1998. V. 54. Iss. 11. P. 1593–1600.
17. *Jones J.A.*, *Post D.A.* Seasonal and successional streamflow response to forest cutting and regrowth in the northwest and eastern United States // Water Resources Research. 2004. V. 40. Iss. 5. DOI: 10.1029/2003WR002952.
18. *Kuzmina E.V.*, *Ol'chev A.V.*, *Rozinkina I.A.*, *Rivin G.S.*, *Nikitin M.A.* Application of the COSMO-CLM Mesoscale Model to Assess the Effects of Forest Cover Changes on Regional Weather Conditions in the European Part of Russia // Russian Meteorology and Hydrology. 2017. V. 42. Iss. 9. P. 574–581.
19. *Sokolova G.V.*, *Makogonov S.V.* Development of the forest fire forecast method (a Case Study for the Far East) // Russian Meteorology and Hydrology. 2013. V. 38. Iss. 4. P. 222–226.
20. *Sorokin A.A.*, *Makogonov S.I.*, *Korolev S.P.* The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia // Scientific and Technical Information Processing. 2017. V. 4. P. 302–304.
21. *Swank W.T.*, *Swift Jr L.W.*, *Douglas J.E.* Streamflow changes associated with forest cutting species conversions and natural disturbances // Forest Hydrology and Ecology at Coweeta. N.Y.: Springer, 1988. P. 297–312.

Investigation of forest hydrological processes in watersheds of the Amur River basin according to satellite and hydrometeorological observations

A. L. Verkhoturov[1], G. V. Sokolova[2], S. A. Bartalev[3], L. S. Kramareva[4]

[1] *Computing Center FEB RAS, Khabarovsk 680000, Russia*
E-mail: andrey@ccfebras.ru

[2] *Institute of the Water and Ecology Problems FEB RAS*
Khabarovsk 680000, Russia
E-mail: pozhar@ivep.as.khb.ru

[3] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: bartalev@smis.iki.rssi.ru

[4] *Far-Eastern Center of State Research Center*
of Space Hydrometeorology "Planeta", Khabarovsk 680000, Russia
E-mail: kramareva@dvrcpod.ru

The watershed is a closed ecosystem in which the role of forests is inextricably linked to hydrological processes. Forest hydrologists generally recognize that due to the "loosening" effect of the root system of the stand, the soil porosity increases, the freezing of soils decreases, and their infiltration capacity increases. The soil intensively "absorbs" atmospheric precipitation under given conditions, contributing, as a result of an increase in water permeability, to a reduction in surface slope flow into river beds. However, now the influence of the forested area of the watershed on the river runoff has been studied insufficiently and a strict functional relationship between these factors has not yet been established. This also applies to the watersheds of the Amur River basin, first studied in the middle of the 20th century. Modern capabilities of methods for remote sensing of the Earth from space to map the vegetation cover on the territory of Russia allow us to continue and extend earlier studies to determine the trends in the annual variation in the forest cover of the watersed area, taking into account the differences of the breed structure (separately coniferous and deciduous) and proportions of native species of trees, using data covering the periods of monsoon rains and floods in 2000–2016.

The paper presents the results of a study of the forest hydrological processes in the watersheds of rivers in the Middle and Lower Amur basin using the data of satellite and terrestrial hydrological and meteorological observations for the period from 2000 to 2016. Variability analysis of the forest-covered watershed area in dynamics including river flow indicators, maximum annual flows and water levels, meteorological indicators (temperature, precipitation) is presented for the eight model river basins (Amgun, Bidzhan, Bureya, Big Bira, Kur, Manoma, Nimelen, Tyrma).

Keywords: basin of Amur River, forest hydrological processes, watershed, streamflow, hydrological mode, digital elevation model, remote sensing

Accepted: 30.07.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-142-154

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Ershov D. V., Isaev A. S., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Uvarov I. A., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektroradiometra MODIS* (Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Mapping of Russia's vegetation cover), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
3. *Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Razdel 1. Poverkhnostnye vody. Seriya 2. Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi 1993 g. Basseiny Amura* (*bez basseinov Shilki*, *Arguni*, *Ussuri*, *Amazara*) *i Udy* (State water cadastre. Section 1. Surface water. Series 2. Annual data on the regime and resources of surface waters of the land), 1997, Vol. 1, Issue 19.

4. Danilin A. K., *Lesoustroistvo Dal'nego Vostoka* (Far East forest management), Khabarovsk: Izdat. gruppa "Nashe vremya", 2009, 335 p.
5. Klintsov A. P., *Zashchitnaya rol' lesov Sakhalina* (The protective role of Sakhalin forests), 1973, 233 p.
6. Kolesnikov B. P., *Lesokhozyaistvennye oblasti taezhnoi zony SSSR i sistemy lesnogo khozyaistva v aspekte dolgosrochnykh prognozov* (Forestry areas of the taiga zone of the USSR and the forestry system in the aspect of long-term forecasts), Informatsionnyi byulleten' Nauchnogo soveta po kompleksnomu osvoeniyu taezhnykh territorii (Information Bulletin of the Scientific Council for the Integrated Development of the Taiga Territory), Irkutsk: Izd. Instituta geografii Sibiri, 1969, No. 2, pp. 9–40.
7. Krestovskii O. I., *Vliyanie vyrubok i vosstanovleniya lesov na vodnost' rek* (Impact of deforestation and restoration of forests on hydrological mode of river), Leningrad, 1986, 117 p.
8. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., *Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy* (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
9. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 18. Dal'nii Vostok. Vypusk 1. Verkhnii i Srednii Amur.* (Resources of surface waters of the USSR. Vol. 18. Far East. Issue 1. Upper and Middle Amur River), Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izd., 1966, 781 p.
10. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Tom 18. Dal'nii Vostok. Vypusk 1. Nizhnii Amur* (Resources of surface waters of the USSR. Vol. 18. Far East. Issue 2. Lower Amur River), Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izd., 1970, 592 p.
11. Solovev K. P., *Kedrovo-shirokolistvennye lesa Dal'nego Vostoka i khozyaistvo v nikh* (Cedar-deciduous forests of the Far East and their economy), Khabarovsk: Khabarovskoe knizhoe izd., 1958, 367 p.
12. Shirokova M. R., Zavisimost' stoka rek mussonnogo klimata ot fiziko-geograficheskikh faktorov v Nizhnem Priamur'e (Dependence of the flow of monsoon climate rivers on physical and geographical factors in the Lower Amur Region), In: *Formirovanie prirodnykh vod Dal'nego Vostoka*, Vladivostok: Dal'nevostochnyi nauchnyi tsentr, AN SSSR, 1983, pp. 43–55.
13. Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Khvostikov S. A., A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data, *Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 5, Issue 1, pp. 55–64.
14. Bonell M., Possible Impacts of Climate Variability and Change on Tropical Forest Hydrology, *Climatic Change*, 1998, Vol. 39, Issue 2, pp. 215–272.
15. Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D., The shuttle radar topography mission, *Rev. Geophys.*, 2007, Vol. 45.
16. Jenson S. K., Domingue J. O., Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, Vol. 54, No. 11, pp. 1593–1600.
17. Jones J. A., Post D. A., Seasonal and successional streamflow response to forest cutting and regrowth in the northwest and eastern United States, *Water Resources Research*, 2004, Vol. 40, Issue 5, DOI: 10.1029/2003WR002952.
18. Kuzmina E. V., Ol'chev A. V., Rozinkina I. A., Rivin G. S., Nikitin M. A., Application of the COSMO-CLM Mesoscale Model to Assess the Effects of Forest Cover Changes on Regional Weather Conditions in the European Part of Russia, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2017, Vol. 42, Issue 9, pp. 574–581.
19. Sokolova G. V., Makogonov S. V., Development of the forest fire forecast method (a Case Study for the Far East), *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, Vol. 38, Issue 4, pp. 222–226.
20. Sorokin A. A., Makogonov S. I., Korolev S. P., The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia, *Scientific and Technical Information Processing*, 2017, Vol. 4, pp. 302–304.
21. Swank W. T., Swift Jr L. W., Douglas J. E., Streamflow changes associated with forest cutting species conversions and natural disturbances, *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*, New York: Springer, 1988, pp. 297–312.