

## Реакция стока реки Урал на изменения высоты снежного покрова в её бассейне в период 2001–2019 гг.

А. Г. Терехов<sup>1,2</sup>, Н. И. Ивкина<sup>2</sup>, Н. Н. Абаев<sup>2,3</sup>, А. В. Галаева<sup>2</sup>, А. Г. Елтай<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК  
Алматы, 050010, Казахстан  
E-mail: aterekhov1@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Республиканское государственное предприятие «Казгидромет»  
Алматы, 050022, Казахстан  
E-mail: terekhov\_a@meteo.kz*

<sup>3</sup> *Казахский национальный университет имени аль-Фараби  
Алматы, 050040, Казахстан  
E-mail: abayev.nurlan@gmail.com*

В работе рассмотрена водность трансграничной р. Урал (Россия – Казахстан), впадающей в Каспийское море и характеризующейся преимущественно снеговым питанием. Среднегодовой объём стока реки в Казахстане в створе гидропоста с. Кушум составляет около 9 км<sup>3</sup>. Изучена взаимосвязь между объёмом годового стока реки и средней высотой снега в её бассейне. В качестве источника информации о высоте снежного покрова использовался суточный продукт Snow Depth FEWS NET с разрешением 0,044×0,044° за период 2001–2019 гг. Показано, что в случае исключения из рассмотрения нескольких лет с аномальными погодными условиями средняя высота снежного покрова в бассейне р. Урал в период с 1 марта по 15 апреля находится в тесной связи с объёмами его годового стока, коэффициент детерминации — 0,89. В период с 2001 по 2019 г. аномальными по погодным условиям были года: 2002, 2004, 2007, 2010, 2011, из которых 2002 и 2004 гг. характеризовались завышением объёма годового стока от ожидаемого уровня, а 2007, 2010 и 2011 гг. — его занижением. Сильнейшая засуха 2010 г. была очевидной причиной занижения речного стока в 2010 и 2011 гг. Прогноз водности р. Урал на 2020 г. на основе средней высоты снега по продукту Snow Depth FEWS NET в её бассейне указывает на ожидаемую маловодность сезона. Прогноз объёма годового стока в 2020 г. составляет 3,1±1,1 км<sup>3</sup>.

**Ключевые слова:** бассейн р. Урал, высота снежного покрова, продукт Snow Depth FEWS NET, годовой сток реки, линейная регрессия, прогноз объёма годового стока

Одобрена к печати: 05.08.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-181-190

### Введение

Снежный покров Евразии — важный источник увлажнения территории. Количество влаги, поступающей в центр континента, определяется особенностями западного переноса переносимой влаги Атлантического океана (Терехов и др., 2020а; Li et al., 2016; Terekhov et al., 2020). Вариативность в количестве накопленного снега на разных пространственных масштабах (Терехов и др., 2019а, 2020б; Liu, Yanai, 2002) влияет на гидрологию суши, в том числе сток рек (Терехов и др., 2016; Титкова, 2019; Черенкова, 2019), состояние водохранилищ (Терехов, Пак, 2019) и внутренних водоёмов (Гинзбург, Костяной, 2018). Особенно это чувствительно для аридных территорий, водообеспеченность которых зависит от рек с преимущественно снежным и снежно-ледовым питанием (Терехов и др., 2019б, 2020б, в).

Урал (название в Казахстане — Жайык) становится основной рекой Прикаспийского региона в Республике Казахстан. Она берёт начало в отрогах Уральских гор на территории Башкортостана (Российская Федерация) и имеет общую протяжённость 2428 км, уступая в Европе по длине только Волге и Дунаю (рис. 1, 2). Водосборный бассейн реки составляет 231 тыс. км<sup>2</sup>, а вместе с бессточным бассейном Урало-Эмбинского междуречья — почти 400 тыс. км<sup>2</sup>. Урал играет особо важную роль для засушливых регионов Атырауской обл., поскольку 70 % потребляемой населением воды обеспечивается из этой реки.



Рис. 1. Расположение бассейна р. Урал



Рис. 2. Часть бассейна р. Урал, использованная для мониторинга средней высоты снега, с нанесёнными шестью метеостанциями. Основа — карта Snow Depth FEWS NET за 1 марта 2020 г.

Сток р. Урал характеризуется значительной межгодовой и сезонной изменчивостью (Сивохиц, Падалко, 2014; Vasil'ev et al., 2016). На речном гидростворе с. Кушум (50°51' с. ш., 51°08' в. д.) средний многолетний годовой расход воды за период 1921–2019 гг. составил 295 м<sup>3</sup>/с, изменяясь от 800 м<sup>3</sup>/с в многоводные годы до 89,1 м<sup>3</sup>/с в маловодные. Этот гидроствор замыкает водосбор с площадью около 190 000 км<sup>2</sup>.

Сток р. Урал на территории России зарегулирован каскадом водохранилищ, сооружённых как на самой реке, так и на её притоках. Наиболее крупные из них: Верхнеуральское —

объём 601 млн м<sup>3</sup>, Магнитогорское — 189 млн м<sup>3</sup>, Ириклинское — 3257 млн м<sup>3</sup>. По условиям водного режима р. Урал относится к казахстанскому типу рек с резко выраженным преобладанием стока в весенний период. Основное питание формируется за счёт талых снеговых вод, которые составляют 60–80 % объёма годового стока. За весенним половодьем следует летне-осенняя, а затем и зимняя межень. Наиболее низкий сток наблюдается зимой. Минимальные значения обычно приходятся на декабрь — март. Максимальный расход воды р. Урал в створе с. Кушум наблюдался в апреле 1957 г. (14000 м<sup>3</sup>/с), наименьший — в феврале 1938 г. (13,6 м<sup>3</sup>/с) (зимний).

Снежный покров в бассейне р. Урал формируется в холодный период, но его влияние на фактический расход воды на границе Казахстан — Российская Федерация из-за регулирования стока Ириклинским водохранилищем прослеживается весь год. Количество снега, накопленное в бассейне, становится практически основным источником питания этой трансграничной реки. Прогноз водности сезона очень востребован для Казахстана как страны нижней части трансграничного бассейна.

Существует две системы мониторинга количества снега, накапливаемого на территориях в холодный период. Это сеть наземных снегомерных пунктов, относящихся к гидрометеорологической службе, и различные дистанционные оценки, опирающиеся на спутниковые данные, обычно совмещённые с модельными расчётами (см., например, работу (Luo *et al.*, 2010)). Дистанционные оценки существуют в разных вариантах, и их точность различается (Захаров, Захарова, 2017; Китаев и др., 2017). Несмотря на большое количество вариантов дистанционных оценок высоты снежного покрова (водного эквивалента снега), продуктов с длинными рядами данных, продолжающихся до текущего момента, не так много. Основными из них оказываются Global Snow Monitoring for Climate Research (GlobSnow) Snow Water Equivalent (SWE) (с 1979 г.) ([https://www.globsnow.info/swe/GlobSnow2\\_SE\\_SWE\\_Product\\_User\\_Guide\\_v1\\_r1.pdf](https://www.globsnow.info/swe/GlobSnow2_SE_SWE_Product_User_Guide_v1_r1.pdf)) и Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data (с 1998) (<https://nsidc.org/data/NSIDC-0447/versions/1>). Эти продукты покрывают Северное полушарие с пространственным разрешением примерно 25×25 км. Глобальные (полушарные) продукты калибруются для лучшего описания всего покрытия. Поэтому для отдельных территорий ошибки могут быть весьма значительными. Например, продукт GlobSnow для территории России имеет уровень невязки для среднесезонных фактических и восстановленных снеготопливов 17–45 %, а совпадений аномальных случаев фактических и восстановленных снеготопливов вообще не выявлено (Китаев и др., 2017). Понятно, что продукты с таким уровнем точности не представляют интереса в задачах оценки объёмов речного стока для локальных бассейнов.

В последние годы появляются более детализированные продукты с пространственным разрешением от 1 км, ориентирующиеся на спутниковые данные MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Hall, Riggs, 2007) с временным покрытием начиная с 2001–2003 гг. Например, Snow Data Assimilation System (SNODAS, <https://nsidc.org/data/G02158/versions/1>) для территории США. Для территории Казахстана и южной части России такого уровня продукт доступен в системе USGS Famine Early Warning Systems NET Data Portal (<https://earlywarning.usgs.gov/fews/ewx/index.html?region=casia>). Валидация продукта Snow Depth FEWS NET для верхней части бассейна р. Урал показала тесную связь с наземными данными по высоте снежного покрова, зарегистрированную на снегомерных пунктах сети гидрометеорологических станций. Коэффициент корреляции Пирсона составил 0,702 для отдельных суточных значений и 0,997 для средних многолетних величин, хотя значения по высоте снега Snow Depth FEWS NET оказались завышенными примерно на 28 % и имели сдвиг (+4 см) относительно наземных измерений (Терехов и др., 2020г).

В обоих вариантах (наземная и дистанционная) оценок характеристик снежного покрова имеются объективные проблемы, приводящие к ошибкам. Уровень искажений оценить трудно, поскольку не существует данных прецизионных измерений количества снега на больших территориях. Коэффициент корреляции Пирсона 0,997 для средних многолетних суточных значений (Терехов и др., 2020г) указывает, что нет принципиальной разницы в уровне точности между наземными метеорологическими наблюдениями и продуктом Snow Depth FEWS

NET. Модельные оценки выгодно отличаются от наземных данных форматом регулярной сетки с периодом, соответствующим используемым спутниковым продуктам.

Целью настоящей работы стал анализ связи между объёмами годового стока р. Урал на гидропосту с. Кушум, находящегося на границе между зоной формирования и зоной транзита стока, и запасами снега в бассейне выше по течению по данным метеорологических наблюдений и продукта Snow Depth FEWS NET. Понятно, что наличие связи между запасами снега в бассейне реки и объёмами стока, особенно в случае рек снегового питания, достаточно тривиально. Но использование в таких работах спутниковых данных, как правило, ограничивается продуктами snow cover (snow extend) (Gafurov et al., 2016). Недостатком такого подхода получается игнорирование температурного режима, который вместе с количеством снега определяет временную динамику площади снежного покрытия. Повышение точности спутниковых продуктов Snow Depth (Snow Water equivalent) открывает новые возможности в анализе взаимосвязи объёма стока реки и количества снега в её бассейне, особенно в случае достаточно больших по площади бассейнов с малым числом стационарных снегомерных пунктов.

### Территория исследования и исходные материалы

Суточный продукт Snow Depth FEWS NET холодного периода (ноябрь – апрель) для сезонов 2000–2020 гг. с пространственным разрешением  $0,044 \times 0,044^\circ$  ( $4,9 \times 2,8$  км для широты  $56^\circ$ ) (<https://earlywarning.usgs.gov/fews/search/Asia/Central%20Asia>) использовался для дистанционного описания высоты снежного покрова в верхней части бассейна р. Урал. Территория исследования включала 10 200 элементарных полигонов (пикселей) в регулярной матрице продукта Snow Depth FEWS NET. Пример суточного продукта Snow Depth FEWS NET представлен на *рис. 2*.

Метеорологические данные по высоте снега на снегомерных пунктах шести выбранных метеостанций брались из системы «Расписание погоды» (<https://gr5.ru/>) (см. *рис. 2*). Эта система предоставляет свободный доступ к данным метеорологических наблюдений с 2005 г., в том числе к суточной информации по высоте снежного покрова. Глубина архива варьировалась от 10 лет (с 2010 г.) для станций Верхнеуральск (WMO ID = 28833) (*англ.* World Meteorological Organization Identifier — международный идентификатор Всемирной метеорологической организации), Кизильское (WMO ID = 28939) и Энергетик (WMO ID = 35038), до 14 лет (с 2005 г.) для станций Магнитогорск (WMO ID = 28838) и Актобе (WMO ID = 35299). По ст. Орск (WMO ID = 35138) доступны данные с 2008 г.

### Методы анализа

Наиболее информативным параметром, характеризующим количество снега в аспекте его связи с объёмом речного стока, оказывается водный эквивалент снега. Но в системе наземного мониторинга и, соответственно, в сопряжённой с ней системе дистанционного мониторинга базовые данные — это высота снега. Переход от высоты снега к водному эквиваленту включает процедуру пересчёта и требует информации по плотности снега и её изменениям во времени. Снежный покров, по сути, — это слоистый продукт, каждый слой которого имеет свои закономерности по эволюции плотности, зависящий от многих факторов (Осокин, Сосновский, 2014). Переход от высоты снега к его водному эквиваленту вносит дополнительные неопределённости и ошибки. Задача настоящего исследования не подразумевала балансовые расчёты с размерностью воды ( $\text{м}^3$ ) для снежного покрова. Речь шла только об эмпирических взаимосвязях, поэтому в качестве параметра, характеризующего снежный покров, была выбрана высота снега.

Высота снега в период мониторинга имеет два основных момента: сезонный максимум и среднее значение. Максимум формируется после снегопада. Плотность свежеснежавшего снега сильно зависит от температурного режима, что вносит дополнительную неопределён-

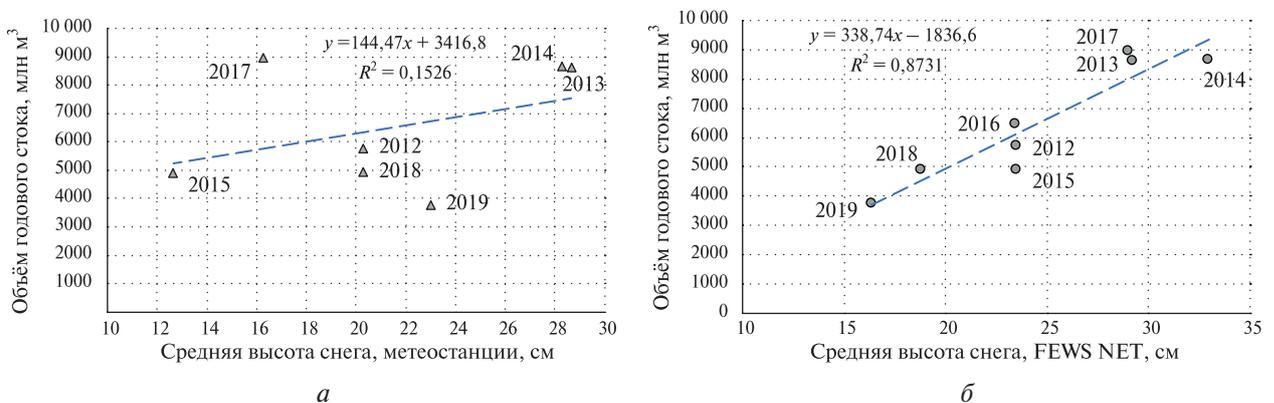
ность в связь между высотой снега и его водным эквивалентом. Средняя высота снежного покрова в течение холодного периода трансформируется через его уплотнение при старении. Средняя плотность снега за достаточно длительный период более или менее стабильна при многолетнем рассмотрении. Таким образом, мы полагали, что средняя высота снега более тесно связана с его водным эквивалентом, а значит и с объёмом стока реки, и использование этого параметра в поставленной задаче более оправдано.

Для характеристики снежного покрова через его среднюю высоту вторым ключевым параметром становится период усреднения. Понятно, что снежный покров, сформированный в ноябре или декабре прошлого года, не так сильно влияет на сток реки, как такое же количество снега, выпавшего в марте или апреле. Потери воды из снежного покрова с испарением — ещё один процесс, вносящий неопределённость во взаимосвязь между количеством твёрдых осадков в бассейне реки и объёмом её годового стока (Постников, 2016). Максимум высоты снега в бассейне р. Урал обычно наблюдается в феврале, освобождение территории от снега заканчивается к концу апреля. Поэтому в качестве времени накопления данных по высоте снега для их усреднения был выбран период с 1 марта по 15 апреля. Более поздние даты отсечения начинают искажать результаты за счёт летних периодов с ранними календарными датами освобождения территории от снега.

Таким образом, в качестве параметра, характеризующего снежный покров на территории исследования, использовалась его средняя высота, полученная по суточным данным в период с 1 марта по 15 апреля (46 значений). Средняя высота снега рассчитывалась как на основе наземных измерений — усреднение по 6 метеостанциям, так и по информации Snow Depth FEWS NET. Наземные данные имели глубину архива с 2005 г., но были фрагментарны для различных метеостанций. Информация, базирующаяся на данных продукта Snow Depth FEWS NET, опиралась на суточный архив 2001–2020 гг. (без пропусков), представленный в виде регулярной сетки данных с периодом 0,044°. Наземные данные со всех метеостанций одновременно имелись только в период с 2012 г., поэтому они использовались только для сравнительного анализа информативности: стандартная схема описания состояния снега на территории контура по имеющимся внутри него наземным измерениям против средних значений выдела из регулярной матрицы Snow Depth FEWS NET.

## Результаты

На *рис. 3* показана взаимосвязь между объёмами годового стока р. Урал (гидропост с. Кушум) и средними оценками высоты снежного покрова, которые рассчитывались из двух синхронизированных по времени баз данных: во-первых, из наземной сети снегомерных пунктов (6 метеорологических станций), во-вторых — через средние значения Snow Depth FEWS NET в контуре анализируемой части бассейна р. Урал.



*Рис. 3.* Взаимосвязь между средней высотой снега (*а* — данные метеонаблюдений; *б* — продукт Snow Depth FEWS NET) и объёмом годового стока р. Урал на гидропосту с. Кушум в период 2012–2019 гг.

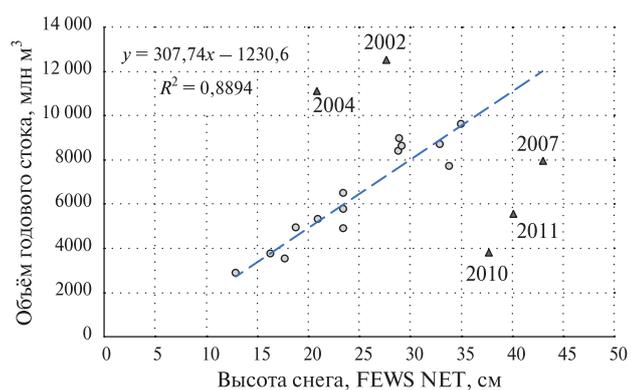


Рис. 4. Взаимосвязь между средней высотой снега (Snow Depth FEWS NET) в бассейне и объёмом годового стока р. Урал на гидропосту с. Кушум за период 2001–2019 гг. Отдельно выделены отбракованные годы (2002, 2004, 2007, 2010, 2011)

Наземные оценки давались только в случае присутствия информации со всех метеостанций. Поэтому на рис. 3 отражены лишь данные периода 2012–2019 гг., причём с пропуском 2016 г., так как в этот год информация по ст. Верхнеуральск отсутствовала. На рис. 4 представлены зависимости между средними значениями высоты снега по данным Snow Depth FEWS NET и объёмами годового стока р. Урал в створе гидропоста с. Кушум в период 2001–2019 гг.

### Обсуждение

Сравнение информативности наземных метеорологических данных по высоте снега со спутниковым продуктом Snow Depth FEWS NET в задаче взаимосвязи с годовым объёмом стока р. Урал (см. рис. 3) показывает преимущество данных Snow Depth FEWS NET. Коэффициент детерминации — 0,88 против 0,15. Неадекватность описания характеристик снежного покрова части бассейна р. Урал по данным 6 метеостанций, очевидно, обусловлена фрагментарностью, наличием лакун в метеорологических данных, что создаёт искажения, масштаб которых практически полностью маскирует функциональную связь «количество снега — объём речного стока». Кроме того, месторасположение станций не отражает всего многообразия условий анализируемой части бассейна р. Урал.

Использование продукта Snow Depth FEWS NET периода 2001–2019 гг. в задаче оценки взаимосвязи «количество снега — объём речного стока» для р. Урал даёт хороший результат только в случае выбраковки некоторых лет. В частности, потребовалось изъятие из временного ряда данных 2002, 2004, 2007, 2010 и 2011 гг., что составляет чуть больше 25 % от общего объёма информации. Эта процедура увеличивает значение коэффициента детерминации для зависимости «высота снега — объём годового стока» до 0,89.

Отбракованные года распадаются на две группы. В первой годовой объём речного стока был существенно больше, чем ожидалось согласно зарегистрированному количеству снега. Это 2002 г. (объём стока больше на 4,5 км<sup>3</sup>) и 2004 г. (на 5,1 км<sup>3</sup>). Во второй группе, наоборот, объём стока был существенно меньше ожидавшегося: в 2007 г. — на 3,0 км<sup>3</sup>, в 2010 г. — на 6,3 км<sup>3</sup> и в 2011 г. — на 4,5 км<sup>3</sup>. Причины неожиданного маловодья 2010 и 2011 гг. очевидны. Аномальная засуха 2010 г. затронула весь бассейн р. Урал (Шмакин и др., 2013), поэтому недобор в объёме годового стока реки в 6,3 км<sup>3</sup> в 2010 г. выглядит совершенно естественно. Интересно, что последствия аномальной засухи 2010 г. сказались также и на объёме речного стока следующего 2011 г. Недобор ещё 4,5 км<sup>3</sup> в 2011 г. даёт оценку уровня сверхнормативного иссушения почвенного слоя из-за аномальной засухи 2010 г., перешедшего на следующий год, примерно в 32 мм воды. Оставшиеся три отбракованных года могут быть следствиями относительно редких особенностей погоды. Например, погодные условия 2002 г. (+4,5 км<sup>3</sup>) характеризовались повышенным уровнем осадком (200 % от нормы) в июне и августе (<http://meteo.ru/component/content/article/93-klimaticheskie-usloviya/180-pogoda-na-territorii-rossijskoj-federatsii-v-2002-godu>).

Большая часть рассмотренных сезонов, 14 лет из общего периода в 19 лет, хорошо укладывается в линейную взаимосвязь между средней высотой снега в анализируемой части бассейна р. Урал и его годовым стоком с коэффициентом детерминации 0,89 и среднеквадратичным отклонением от уравнения линейной регрессии 0,5 км<sup>3</sup> (см. рис. 3.)

## Заключение

Таким образом, средняя высота снежного покрова в верхней части бассейна р. Урал, регистрируемая с помощью продукта Snow Depth FEWS NET (2001–2019), в период с 1 марта по 15 апреля имела тесную связь с объёмом годового стока этой реки. Тем не менее в отдельные годы с аномальной погодой фактический объём стока может существенно отклоняться от его ожидаемой величины. Эмпирическая кривая взаимосвязи между средней высотой снега и объёмом годового стока может использоваться для долгосрочного прогноза водности р. Урал. На 2020 г. средняя высота снега в анализируемой части бассейна р. Урал составила 14,12 см, что соответствует прогнозу объёма годового стока в  $3,1 \pm 1,1 \text{ км}^3$  (надёжность 0,95). То есть в 2020 г. ожидается маловодье р. Урал.

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан, проекты AP 08957394 и AP 05134241.

## Литература

1. Гинзбург А. И., Костяной А. Г. Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е – 2017 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 195–207. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207.
2. Захаров А. И., Захарова Л. Н. Наблюдения динамики снежного покрова на радарных интерферограммах L-диапазона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 190–197. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-190-197.
3. Китаев Л. М., Тихонов В. В., Титкова Т. Б. Точность воспроизведения по спутниковым данным аномальных значений снеготолщин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 27–39. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-27-39.
4. Осокин Н. И., Сосновский А. В. Пространственная и временная изменчивость толщины и плотности снежного покрова на территории России // Лёд и Снег. 2014. Т. 54. № 4. С. 72–80. DOI: 10.15356/2076-6734-2014-4-72-80.
5. Постников А. Н. Испарение с поверхности снежного покрова за период его залегания на территории России // Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та. 2016. № 42. С. 55–63.
6. Сивохин Ж. Т., Падалко Ю. А. Географо-гидрологические факторы опасных гидрологических явлений в бассейне реки Урал // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2014. № 6. С. 53–61. DOI: 10.15356/0373-2444-2014-6-53-61.
7. Терехов А. Г., Пак А. А. Спутниковый прогноз влияния пополнения Капшагайского водохранилища (КНР) на водность трансграничной р. Иле в 2019 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 298–302. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-298-302.
8. Терехов А. Г., Пак И. Т., Долгих С. А. Спутниковые наблюдения аномального весеннего паводка 2016 года в низовьях реки Аягуз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 273–276. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-273-276.
9. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Юничева Н. Р. (2019а) Аномальный режим снежности 2019 г. и многолетние тренды в изменениях высоты снежного покрова Казахстана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 351–355. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-351-355.
10. Терехов А. Г., Витковская И. С., Абаев Н. Н., Долгих С. А. (2019б) Многолетние тренды в состоянии растительности хребтов Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау по данным eMODIS NDVI C6 (2002–2019) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 133–142. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-133-142.
11. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Витковская И. С., Пак А. А., Егембердиева З. М. (2020а) О связи между состоянием горной растительности Тянь-Шаня и индексами североатлантической осцилляции в весенне-летний период следующего года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 275–281. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-275-281.
12. Терехов А. Г., Ивкина Н. И., Юничева Н. Р., Витковская И. С., Елтай А. Г. (2020б) Изменения снежного покрова сухих степей и полупустынь Казахстана на примере бассейна реки Эмбы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 101–113. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-101-113.

13. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Лагутин Е. И. (2020в) Диагностика водообеспеченности сельскохозяйственных культур СУАР КНР в течение 2003–2019 гг. по данным eMODIS NDVI C6 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 128–138. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-128-138.
14. Терехов А. Г., Ивкина Н. И., Абаев Н. Н., Алтай А. Г., Егембердиева З. М. (2020г) Валидация суточного продукта Snow Depth FEWS NET для бассейна реки Урал по данным метеорологических наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 31–40. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-31-40.
15. Титкова Т. Б. Изменение климатических условий формирования зимнего стока в бассейне Верхнего Дона по спутниковым и наземным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 147–157. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-147-157.
16. Черенкова Е. А. Тенденции зимнего увлажнения территории бассейнов Северной Двины и Печоры в XX–начале XXI вв. по наземным и спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 285–292. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-285-292.
17. Шмакин А. Б., Чернавская М. М., Попова В. В. «Великая» засуха 2010 г. на Восточно-Европейской равнине: исторические аналоги, циркуляционные механизмы // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2013. № 6. С. 59–75.
18. Hall D. K., Riggs G. A. Accuracy assessment of the MODIS snow products // Hydrological Processes. 2007. V. 21. Iss. 12. P. 1534–1547. DOI: 10.1002/hyp.6715.
19. Gafurov A., Lüdtke S., Unger-Shayesteh K., Vorogushyn S., Schone T., Schmidt S., Kalashnikova O., Merz B. MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data // Environmental Earth Science. 2016. V. 75. Art. 1078. 15 p. DOI: 10.1007/s12665-016-5869-x.
20. Li J., Fan K., Xu Z. Links between the late wintertime North Atlantic Oscillation and springtime vegetation growth over Eurasia // Climate Dynamics. 2016. V. 46. P. 987–1000. DOI: 10.1007/s00382-015-2627-9.
21. Liu X., Yanai M. Influence of Eurasian spring snow cover on Asian summer rainfall // Intern. J. Climate. 2002. V. 22. Iss. 9. P. 1075–1089. DOI: 10.1002/joc.784.
22. Luo J. K., Pulliainen J., Takala M., Lemmetyinen J., Derksen C., Wang L. Snow Water Equivalent (SWE) product guide. Version 1.0/01. European space agency study contract report. ESRIN contract 21703/08/I-EC. Global snow monitoring for climate research. 15 Dec. 2010. 15 p.
23. Terekhov A. G., Vitkovskaya I. S., Abayev N. N. The effect of changing stratification in the atmosphere in central zone of Eurasia according to vegetation data of Tien Shan mountains during 2002–2019 // E3S Web Conf. 2020. V. 149. Art. 03004. 7 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202014903004.
24. Vasil'ev D. Y., Sivohip J. T., Chibilev A. A. Climate dynamics and interdecadal discharge fluctuations in the Ural River basin // Doklady Earth Science. 2016. V. 469. P. 710–715. DOI: 10.1134/S1028334X16070096.

## Streamflow response of the Ural River to basin snow depth changes during 2001–2019

A. G. Terekhov<sup>1,2</sup>, N. I. Ivkina<sup>2</sup>, N. N. Abayev<sup>2,3</sup>, A. V. Galayeva<sup>2</sup>, A. G. Yeltay<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Information and Computing Technology MES RK  
Almaty 050010, Kazakhstan

E-mail: aterekhov1@yandex.ru

<sup>2</sup> RSE Kazhydromet, Almaty 050022, Kazakhstan

E-mail: terekhov\_a@meteo.kz

<sup>3</sup> Al-Farabi Kazakh National University, Almaty 050040, Kazakhstan

E-mail: abayev.nurlan@gmail.com

The paper considers the transboundary runoff of the Ural River (Russia – Kazakhstan), which flows into the Caspian Sea. The Ural River is mainly snow-fed. The average annual river flow in Kazakhstan at the Kushum gauging station is about 9 km<sup>3</sup>. The relationship between the annual Ural River outflow and the average snow depth in its basin was studied. The daily product Snow Depth FEWS NET

for the period 2001–2019 was used. It is shown that if several years with abnormal weather conditions are excluded from consideration, the average snow cover depth in the Ural River basin in the period from March 1 to April 15 is closely related to the annual river runoff, the coefficient of determination is 0.889. In the period from 2001 to 2019, abnormal weather conditions were in 2002, 2004, 2007, 2010 and 2011, of which 2002 and 2004 were characterized by increased volumes of annual river runoff compared to the expected level, and 2007, 2010, 2011 by decreased volumes. The severe drought of 2010 was the obvious reason for the understatement of the Ural River outflow in 2010 and 2011. The forecast of the annual outflow for 2020 based on the average snow depth derived by Snow Depth FEWS NET in its basin indicates the expected low-water season. The forecast volume of annual runoff in 2020 is  $3.1 \pm 1.1 \text{ km}^3$ .

**Keywords:** Ural River basin, snow depth, Snow Depth FEWS NET, annual river outflow, linear regression, annual river outflow forecast

Accepted: 05.08.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-181-190

## References

1. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Tendentsii izmenenii gidrometeorologicheskikh parametrov Kaspiskogo morya v sovremenniy period (1990-e – 2017 gg.) (Tendencies of changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990s – 2017)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 195–207, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207.
2. Zakharov A. I., Zakharova L. N., Nablyudeniya dinamiki snezhnogo pokrova na radarnykh interferogramakh L-diapazona (Observation of snow cover dynamics on L-band SAR interferograms), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 7, pp. 190–197, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-190-197.
3. Kitaev L. M., Tikhonov V. V., Titkova T. B., Tochnost' vosproizvedeniya po sputnikovym dannym anomal'nykh znachenii snegozapasov (The accuracy of snow water equivalent anomalies retrieval from satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 27–39, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-27-39.
4. Osokin N. I., Sosnovsky A. V., Prostranstvennaya i vremennaya izmenchivost' tolshchiny i plotnosti snezhnogo pokrova na territorii Rossii (Spatial and temporal variability of depth and density of the snow cover in Russia), *Led i Sneg*, 2014, Vol. 54, No. 4, pp. 72–80, DOI: 10.15356/2076-6734-2014-4-72-80.
5. Postnikov A. N., Isparenie s poverkhnosti snezhnogo pokrova za period ego zaleganiya na territorii Rossii (Evaporation from the surface of snow cover for the period of its occurrence on the territory of Russia), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2016, No. 42, pp. 55–63.
6. Sivokhip Zh. T., Padalco Yu. A., Geografo-gidrologicheskie faktory opasnykh gidrologicheskikh yavlenii v basseine reki Ural (Geographical and hydrological factors of dangerous hydrological phenomena of the Ural River basin), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2014, No. 6, pp. 53–61, DOI: 10.15356/0373-2444-2014-6-53-61.
7. Terekhov A. G., Pak A. A., Sputnikovyi prognoz vliyaniya popolneniya Kapshagaiskogo vodokhranilishcha (KNR) na vodnost' transgranichnoi reki Ile v 2019 godu (Influence of the Kapshagay reservoir (China) refill on transboundary River Ile runoff and satellite-based forecasting), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 298–302, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-298-302.
8. Terekhov A. G., Pak I. T., Dolgikh S. A., Sputnikovye nablyudeniya anomal'nogo vesennego pavodka 2016 goda v nizov'yakh reki Ayaguz (Satellite observations of the anomalous spring flood at the lower reach of the Ayaguz River in 2016), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 273–276, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-273-276.
9. Terekhov A. G., Abayev N. N., Yunicheva N. R. (2019a), Anomal'nyi rezhim snezhnosti 2019 g. i mnogoletnie trendy v izmeneniyakh vysoty snezhnogo pokrova Kazakhstana (Anomalous snow regime in 2019 and long-term trends in snow depth in Kazakhstan), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 351–355, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-351-355.
10. Terekhov A. G., Vitkovskaya I. S., Abayev N. N., Dolgikh S. A. (2019b), Mnogoletnie trendy v sostoyanii rastitel'nosti khrebtov Tyan'-Shanya i Dzhungarskogo Alatau po dannym eMODIS NDVI C6 (2002–2019) (Long term trends in vegetation in Tien-Shan and Dzungarian Alatau from eMODIS NDVI C6 (2002–2019)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 133–142, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-133-142.

11. Terekhov A. G., Abayev N. N., Vitkovskaya I. S., Pak A. A., Egemberdieva Z. (2020a), O svyazi mezhdu sostoyaniem gornoi rastitel'nosti Tyan'-Shanya i indeksami severoatlanticheskoi ostillyatsii v vesenne-letnii period sleduyushchego goda (Links between the vegetation state over Tien-Shan mountains and North Atlantic Oscillation indices of the upcoming season), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No 2, pp. 275–281, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-275-281.
12. Terekhov A. G., Ivkina N. I., Yunicheva N. R., Vitkovskaya I. S., Yeltay A. G. (2020b), Izmeneniya snezhnogo pokrova sukhikh stepei i polupustyn' Kazakhstana na primere basseina reki Emby (Snow cover changes of the Kazakhstan dry steppes and semi-deserts: the case of River Emba basin studies), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 101–113, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-101-113.
13. Terekhov A. G., Abayev N. N., Lagutin E. I. (2020v), Diagnostika vodoobespechennosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur SUAR KNR v techenie 2003–2019 gg. po dannym eMODIS NDVI C6 (Diagnostic of water availability of agricultural crops in Xinjiang (China) in 2003–2019 based on eMODIS NDVI C6 data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 128–138, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-128-138.
14. Terekhov A. G., Ivkina N. I., Abayev N. N., Yeltay A. G., Egemberdieva Z. (2020g), Validatsiya sutochnogo produkta Snow Depth FEWS NET dlya basseina reki Ural po dannym meteorologicheskikh nablyudenii (Validation of daily Snow Depth FEWS NET product over River Ural basin on snow depth meteorological observations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No 3, pp. 31–40, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-31-40.
15. Titkova T. B., Izmenenie klimaticheskikh uslovii formirovaniya zimnego stoka v basseine Verkhnego Dona po sputnikovym i nazemnym dannym (Change in climatic conditions of winter runoff formation in the Upper Don basin revealed by satellite and ground data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 147–157, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-147-157.
16. Cherenkova E. A., Tendentsii zimnego uvlazhneniya territorii basseinov Severnoi Dviny i Pechory v XX–nachale XXI vv. po nazemnym i sputnikovym dannym (Trends of winter humidification of the Northern Dvina and Pechora basins in the 20<sup>th</sup> – early 21<sup>st</sup> centuries based on terrestrial and satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 285–292, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-285-292.
17. Shmakina A. B., Chernavskaya M. M., Popova V. V., “Velikaya” zasukha 2010 g. na Vostochno-Evropeiskoi ravnine: istoricheskie analogi, tsirkulyatsionnye mekhanizmy (2010 GREAT DROUGHT at the East European Plain: Historical Analogies and Circulation Mechanisms), *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Ser. geograficheskaya*, 2013, No. 6, pp. 59–75.
18. Hall D. K., Riggs G. A., Accuracy assessment of the MODIS snow products, *Hydrological Processes*, 2007, Vol. 21, Issue 12, pp. 1534–1547, DOI: 10.1002/hyp.6715.
19. Gafurov A., Lütke S., Unger-Shayesteh K., Vorogushyn S., Schone T., Schmidt S., Kalashnikova O., Merz B., MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data, *Environmental Earth Science*, 2016, Vol. 75, Art. 1078, 15 p., DOI: 10.1007/s12665-016-5869-x.
20. Li J., Fan K., Xu Z., Links between the late wintertime North Atlantic Oscillation and spring-time vegetation growth over Eurasia, *Climate Dynamics*, 2016, Vol. 46, pp. 987–1000, DOI: 10.1007/s00382-015-2627-9.
21. Liu X., Yanai M., Influence of Eurasian spring snow cover on Asian summer rainfall, *Intern. J. Climate*, 2002, Vol. 22, Issue 9, pp. 1075–1089, DOI: 10.1002/joc.784.
22. Luo J. K., Pulliainen J., Takala M., Lemmetyinen J., Derksen C., Wang L., *Snow Water Equivalent (SWE) product guide, Version 1.0/0.1, ESA study contract report, ESRIN contract 21703/08/I-EC, Global snow monitoring for climate research*, 15 Dec. 2010, 15 p.
23. Terekhov A. G., Vitkovskaya I. S., Abayev N. N., The effect of changing stratification in the atmosphere in central zone of Eurasia according to vegetation data of Tien Shan mountains during 2002–2019, *E3S Web Conf.*, 2020, Vol. 149, Art. 03004, 7 p., DOI: 10.1051/e3sconf/202014903004.
24. Vasil'ev D. Y., Sivohin J. T., Chibilev A. A., Climate dynamics and interdecadal discharge fluctuations in the Ural River basin, *Doklady Earth Science*, 2016, Vol. 469, pp. 710–715, DOI: 10.1134/S1028334X16070096.