

УДК 556.1

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА БАСЕЙНА РЕКИ СЕДЭЯХИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ГИДРОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Т.А. Локтионова¹, А.А. Ерофеев¹, С.Г. Копысов^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН



В работе построены карты и описана методика расчета среднееголетних значений элементов водного баланса для бассейна реки Седяхи (Ямало-Ненецкий автономный округ) с использованием модели гидролого-климатических расчетов. Выявлено, что вклад теплоэнергетических ресурсов испарения в функционирование лесотундровых геосистем, в силу эффекта «запирающего» воздействия многолетней мерзлоты, весьма значителен. Рост испаряемости на 19 % приводит к уменьшению стока почти в 2 раза. Результаты моделирования верифицированы на малом лесотундровом водосборе.

Ключевые слова: ландшафт, сток, климат, многолетняя мерзлота, рельеф.

Введение

Процессы и условия функционирования ландшафтов севера Западной Сибири весьма разнообразны и тесно взаимосвязаны. Например, при обсуждении прогнозов изменения климата Арктики отмечено, что «среднегодовые значения разности осадков и испарения ($P - E$) над водосборами суши, окружающей северный ледовитый океан, и, соответственно, речного стока в него, возрастают во всех сценариях» [Павлова, Катцов, 2015, с. 29]. При этом система гидрометрических и метеорологических наблюдений для данной территории представлена крайне редко [Действующие метеорологические станции, 2020]. Кроме того, имеющиеся пункты наблюдений зачастую находятся в близости от городов и в долинах крупных рек, являющимися зонами и коридорами тепляющего воздействия. Это одна из причин, которая увеличивает фактор неопределенности при моделировании распределения элементов гидрологического цикла (испарения, испаряемости, водного стока и др.) для глобальных моделей.

Современное состояние проблемы и постановка задач исследования. Элементы гидрологического цикла, как правило, определяются на основе баз гидрометеорологических данных. Часть этих показателей контролируется непосредственными измерениями на специально отобранных ключевых участках и малых водосборах, а также по данным сети наблюдений на малых и средних реках. При недостатке информации в гидрологическом моделировании принято использовать либо модели со сосредоточенными параметрами, либо распределенные модели, но со значительным осреднением входящих в них показателей [Bui et al., 2020]. В работе [Калинин и др., 2018] были использованы данные Landsat для

определения альбедо земной поверхности, а в [Коновалов, Рудаков, 2015] – горных ледников. Моделирование гидрологического функционирования с использованием метода гидролого-климатических расчетов (ГКР) и геоморфометрического анализа цифровых моделей высот для территории центральной части Западной Сибири выполнено в [Kopysov et al., 2015]. В работе [Ерофеев и др., 2018] связь орграфических условий и увлажнения в методе ГКР продемонстрирована на малом модельном водосборе.

Цели и задачи исследования. В условиях взаимосвязи протекания процессов гидрологического цикла на уровне деятельной поверхности наиболее целесообразно оценивать динамику каждого условия не по отдельности, а с помощью интегрального (балансового) подхода. Метод ГКР [Мезенцев В.С., 1982] соответствует предъявляемым критериям, поскольку является генетическим по отношению к основным элементам водного баланса, а в сочетании с различной априорной (дистанционной) информацией позволяет выявить количественные взаимосвязи в структуре и функционировании ландшафтов бассейнов средних и крупных рек. В ряде последних статей, посвященных обзору систем моделирования, применимых для мерзлотных водосборов Арктического региона [Fabre et al., 2017; Bui et al., 2020] модель ГКР, на наш взгляд, незаслуженно оставлена без внимания. Одной из возможных причин, по нашему мнению, является отсутствие полноценных методических работ использования этой модели в условиях водосборов севера Западной Сибири. Данная работа призвана восполнить имеющийся недостаток.

С использованием метода ГКР и геоморфометрического анализа цифровой модели высот ArcticDEM в работе планируется рассчитать GRID-матрицы и

построить карты со среднемноголетними значениями элементов водного баланса для бассейна реки Седэяхи, расположенной в лесотудровой зоне севера Западной Сибири. Результаты моделирования планируется верифицировать при помощи автоматических датчиков измерения гидрофизических параметров на малом модельном водосборе.

Объект исследования

Река Седэяха – левый приток реки Евояха (водосборный бассейн Пура), расположена на юге Ямало-Ненецкого автономного округа. Протяженность русла

реки – 145 км, площадь ее водосборного бассейна – 1 310 км² (рис. 1). Отличительной особенностью ландшафтов бассейна является широкое развитие болот и озер, занимающих около 70 % территории [Атлас..., 2004]. Территория бассейна преимущественно представлена лесотундровым типом местности. В поймах малых рек, из-за активного дренирования, встречается угнетенный лиственный лес. На террасах и междуречье в понижениях формируется широко распространенный хасырейный тип ландшафтов. В его структуре доминируют болотные и луговые урочища. Сохраняются акватории не заросших озер [Бобрик и др., 2017].

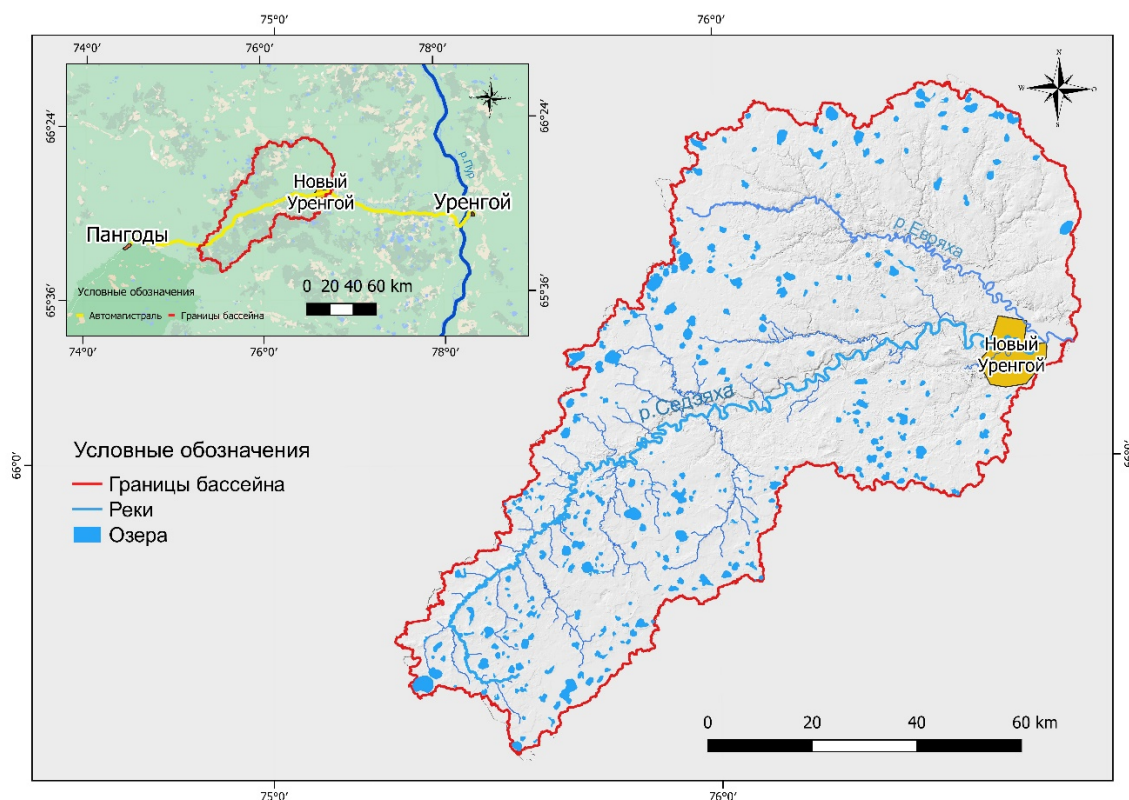


Рис. 1. Географическое расположение бассейна реки Седэяхи

Fig. 1. Spatial location of the River Sedeyaha catchment basin

Поверхность территории представляет собой низкую аккумулятивную равнину с довольно однообразным рельефом, главными элементами которого являются широкие плоские междуречья и речные долины [Кашменская, Земцов, 1988]; характерны различные формы проявления многолетней мерзлоты, повышенная заболоченность.

В области распространения морских аккумулятивных и моренных равнин общая равнинность территории нарушается моренными пологоувалистыми и холмисто-увалистыми возвышенностями. Важнейшей физико-географической особенностью

является наличие многолетнемерзлых горных пород. Заболачивание является одним из наиболее активных рельефообразующих процессов ввиду преобладания плоских равнинных поверхностей, сурового климата, низкой испаряемости при значительном количестве осадков, широкого распространения супесчано-суглинистых пород [Голубятников и др., 2015]. Вследствие выравнивания рельефа на междуречье, водоразделы между отдельными притоками и озерами идентифицировать визуально и даже картометрическим способом достаточно трудно.

Моделирование гидрологического цикла: параметры и модели

Гидролого-климатические расчеты. Методология моделирования основана на использовании метода ГКР. Данный метод представляет собой математическую модель процессов преобразования влаги на уровне деятельной поверхности водосборов [Гушля, Мезенцев, 1982]:

$$Y = H - Z = H - Z_M * \left[1 + \left(\frac{H}{Z_M} \right)^{-n} \right]^{-1/n}, \quad (1)$$

где Z – испарение с поверхности (мм); Z_M – водный эквивалент теплоэнергетических ресурсов испарения (мм); n – параметр ландшафтных условий стока; H – суммарное увлажнение (мм).

По мнению некоторых исследователей [Карнацевич, Хрущев, 2014], модель ГКР имеет небольшое число параметров, позволяет при редкой сети метеонаблюдений привлекать данные модельных реанализов по температурам воздуха и атмосферным осадкам в узлах координатной сетки и выполнять расчет текущих водно-тепловых балансов с заданным интервалом дискретности. В теплый период при моделировании гидрографа стока и других показателей водного баланса можно выполнять расчеты с суточным шагом. Этими же авторами [Карнацевич, Хрущев, 2014] отмечена хорошая сходимость результатов расчета с натурными данными.

Параметры модели ГКР допускают большую детализацию по территории и временную изменчивость в зависимости от реальных или задаваемых в виде сценариев изменений климата в разных природных зонах и ландшафтах. Таким образом, модель ГКР фактически представляет собой модель с распределенными в пространстве и по времени параметрами. Уравнения теплового и водного баланса в этой модели связаны через величину испарения с поверхности водосбора.

Геоинформационное моделирование. Основные этапы геоинформационного моделирования были проведены в ГИС-пакете с открытым исходным кодом SAGA. Для учета пространственных неоднородностей формирования стока, для территории всего водосборного бассейна был выполнен геоморфометрический анализ, а для учета пространственной дифференциации теплоэнергетических ресурсов испарения – использованы данные о спектральном альбедо (спектральный канал Spatial Reflectance, имеющийся в космических снимках Landsat 7 и Landsat 8), совмещенные с данными климатического реанализа. Расчеты выполнены для июля 2010 и 2015 гг., в которых наблюдались контрастные условия температуры и выпадения осадков [Специализированные массивы..., 2020]. Основные характеристики снимков приведены в табл. 1.

Пространственные границы бассейна реки Седэяхи определялись путем автоматической клас-

сификации цифровых моделей рельефа ArcticDEM с пространственным разрешением 2 м в модуле Catchment Boundary ГИС-пакета SAGA [Satellite Image Analysis..., 2020]. Базовая картографическая информация в виде векторных ГИС-слоев гидросети, объектов инженерной инфраструктуры (дорог, населенных пунктов и др.) создавалась путем оцифровки космических снимков Sentinel 2a.

Помимо векторных данных при моделировании элементов гидрологического цикла, большое внимание было уделено растровым изображениям, содержащим разнообразную информацию о климате, характере рельефа, структуре землепользования и др. Содержание коллекции растровых слоев приведено в табл. 2.

Данные с высоким пространственным разрешением ArcticDEM использовались для моделирования степени гидроморфности ландшафта. ArcticDEM представляет собой цифровую модель высот (ЦМВ), создаваемых на основе космических снимков с высоким пространственным разрешением (приблизительно 0,5 м), получаемых с помощью группировки спутников DigitalGlobe [ArcticDEM, 2020]. Для бассейна реки Седэяхи были рассчитаны ЦМВ с шагом сетки 2, 10 и 30 м.

Гидролого-климатический мониторинг. Для организации постоянного мониторинга за параметрами гидрологического цикла водосборов севера Западной Сибири, был выбран верхний левый приток реки Седэяхи (ручей) с площадью водосбора 24 км² (65°49'42" с.ш., 75°24'01" в.д.).

На исследуемом ручье было проведено устройство водомерного поста с учетом следующих требований:

- участок устройства водомерного поста на протяжении трехкратной ширины является прямолинейным, открытым, доступным для измерений;
- русло устойчивое (не размывается и не заиляется);
- пост располагается на расстоянии не меньше пятикратной ширины от устья ближайших притоков и вне сферы влияния подпоров от заторов льда и гидротехнических сооружений;
- течение воды параллельно-струйное, без завоедей, косых и обратных течений и порогов;
- дно ручья не имеет значительных выступов, мешающих измерению глубин и скоростей течения.

Водомерный пост был оборудован системой автоматического мониторинга «САМУВ» (производитель ИМКЭС СО РАН, г. Томск) с двумя датчиками уровня воды. Диапазон измеряемых температур прибора колеблется от 0 до 50 °С и с погрешностью ±0,2 °С. Диапазон измеряемых уровней до 5 м и погрешностью не более 1 %.

В ходе экспедиционных исследований 22 августа 2014 г. была проведена тахеометрическая съемка, на основании которой построен поперечный профиль

русла и долины ручья. Также были проведены измерения скоростей течения ручья, по результатам которых получен расход воды. На основании полученного расхода воды по гидравлическим формулам определен коэффициент шероховатости русла.

На основании измеряемых в автоматическом режиме данных о колебаниях уровней воды и гидравлическим формулам для равномерного движения в естественных руслах были рассчитаны расходы воды ($\text{м}^3/\text{с}$) исследуемого ручья за период с 23.08.2014 по 03.10.2014 г.

Для информационного обеспечения моделирования многолетней динамики элементов гидрологического цикла ландшафтов репрезентативных водосборов рек

равнинной и высокогорной Арктики на основе информации с установленных на малом модельном водосборе гидрофизических датчиков, была сформирована база данных «Пространственно-временная динамика элементов гидрологического цикла репрезентативных водосборов рек равнинной и высокогорной Арктики» [Ерофеев и др., 2020]. Гидрофизический мониторинг выполнялся нами на следующих участках:

- 1) русло реки ($65^{\circ}51'05,31''$ с.ш., $75^{\circ}23'05,37''$ в.д.);
- 2) ручей-проталина и лиственничный лес ($65^{\circ}51'06,97''$ с.ш., $75^{\circ}22'38,72''$ в.д.);
- 3) бугристый торфяник на междуречье ($65^{\circ}51'20,78''$ с.ш., $75^{\circ}20'59,64''$ в.д.).

Содержание базы данных представлено в табл. 3.

Таблица 1

Основные характеристики снимков космических снимков

Table 1

The main characteristics of satellite imagery

Тип данных	Дата	Время	Пространственное разрешение, м	Источник данных
Landsat 7	01.07.2010	11:14	30	https://earthexplorer.usgs.gov
Landsat 8	20.07.2015	11:28	30	https://earthexplorer.usgs.gov

Таблица 2

Коллекция растровых слоев для моделирования

Table 2

Collection of raster layers for modelling

Вид данных	Период получения данных	Пространственное разрешение	Источник данных
Цифровая модель высот	—	2 м	ArcticDEM (www.pgc.umn.edu/data/arcticdem)
Атмосферные осадки	1970–2016	1 км	WorldClim (https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html)
Солнечная радиация	1970–2016	1 км	WorldClim (https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html)
Средняя температура	1970–2016	1 км	WorldClim (https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html)
Sentinell 2a	2019	10 м	Earth Explorer USGS (https://earthexplorer.usgs.gov/)

Таблица 3

Структура и содержание табличной информации в базе данных для бассейна реки Седэяхи

Table 3

Structure and content of tabular information in the database for the Sedeyaha river basin

№	Расположение	Показатель	Измерительное оборудование	Даты работы
1	Русло реки	Температура воды, °C Уровень воды, см Среднесуточный слой стока, мм/сут	САМУВ-150. Причина прекращения измерений – падение напряжения батареи	22.07.2014 – 01.04.2019
2	Ручей-проталина и лиственничный лес	Температура воды, °C Температура воздуха на высоте 2 м, °C Электропроводность воды, сим Уровень воды, мм Влажность воздуха, % Температура почвы по глубине, °C	САМУВ-153. Причина прекращения измерений – заглохло датчик	23.08.2014 – 15.05.2015
3	Бугристый торфяник на междуречье	Электропроводность воды, сим	САМУВ-152. Причина прекращения измерений – поврежден животными	23.08.2014 – 05.09.2015
		Температура почвы на поверхности, °C		23.08.2014 – 20.08.2015

Методика геоинформационного моделирования включала в себя два этапа (рис. 2) и ряд последовательных операций:

- загрузку ЦМБ ArcticDEM;
- сшивку и геометрическую коррекцию (пространственную привязку) ЦМБ;
- гидрологическую коррекцию ЦМБ (заполнение пустот и псевдопонижений для моделирования поверхностного стока);
- расчет направлений стока в потенциальной гидрографической сети и определение площади для каждого звена водостока;
- расчет границ водосборного бассейна реки Седэхи;
- расчет морфометрических параметров для гидролого-климатических расчетов.

Одним из важнейших параметров методики является параметр направлений стока (Flow Direction) и идентификации структуры водосборов (Watershed Delineation), служащий основой для определения площади каждого звена водостока и последующего создания площади водосборного бассейна. Среди других морфометрических параметров также был рассчитан индекс потенциальной влажности (Topographic Wetness Index) [Beven, Kirkby, 1979; Ерофеев, 2012]. Он использовался для анализа степени гидроморфности ландшафтов, а также для расчета параметра ландшафтных условий формирования стока n (рис. 5).

Гидролого-климатические расчеты включали в себя моделирование среднесезонных показателей испарения, испаряемости и водного стока. Расчет теплоэнергетических ресурсов испарения (Z_m) был связан с расчетом спектрального альбедо (A), измеряемого сенсором Landsat 7 и 8 и преобразуемого в значения поглощенной солнечной радиации посредством формулы (3).

При расчете альбедо применялся модуль Top of Atmosphere Reflectance ГИС-пакета SAGA, выполняющий калибровку. Для этого необходимо было указать используемые для калибровки каналы (Bands), а также файл калибровки MTL – MetadataFile. Важной особенностью данного модуля является наличие функции атмосферной коррекции (Atmospheric Correction).

По своей физической природе альбедо, получаемое на основе мультиспектральных оптических спутниковых снимков, является узкополосным, с необходимостью его преобразования в широкополосное (единое значение альбедо снега для всех спектральных интервалов) и коротковолновое (длины волн от 0,38 до 2,5 мкм). Поэтому было произведено соответствующее преобразование, которое позволяет выполнять расчеты энергетического баланса, а в нашем случае – элементов гидрологического цикла. Для этого использовалась формула (2), предложенная S. Liang [2000].

$$0,356 \times b_2 + 0,130 \times b_4 + 0,373 \times b_5 + 0,085 \times b_6 + 0,072 \times b_7 - 0,018, \quad (2)$$

где $b(n)$ – спектральная полоса космического снимка Landsat 8.

Основные характеристики космических снимков сенсоров Landsat 7 и 8, используемых для расчета спектрального альбедо бассейна реки Седэхи, приведены в табл. 4. Результаты расчетов данных показателей для космических снимков, полученных 1 июля 2010 и 20 июля 2015 г. показаны на рис. 3.

После расчета спектрального альбедо были рассчитаны теплоэнергетические ресурсы испарения (Z_m). Для этого на первом этапе была получена поглощенная солнечная радиация (часть суммарной солнечной радиации, поглощаемая подстилающей поверхностью). Блок метеорологических показателей (параметры солнечной радиации, количество атмосферных осадков и др.) получен через интернет-сервис с данными климатического реанализа WorldClim версии 2.0 [Fick, Hijmans, 2017], представленных в виде растров осредненных среднемесячных значений. В расчетах применялись именно эти данные по причине того, что данные с WorldClim покрывают всю поверхность суши (за исключением Антарктиды) и доступны для получения в разных форматах и с различным пространственным разрешением вплоть до 30 угловых секунд (примерно 1 км²). Поглощенная солнечная радиация (R_k) за расчетный месяц была определена по формуле:

$$R_k = (1 - A), \quad (3)$$

где A – спектральное альбедо земной поверхности в долях от единицы.

После определения поглощенной солнечной радиации, для расчета теплоэнергетических ресурсов (Z_m) по поглощенной радиации использовалось эмпирическое выражение (4), общие результаты отображены на графике (рис. 4):

$$Z_m = 2/3 * R_k, \quad (4)$$

где R_k – поглощенная радиация.

В методе ГКР орографические условия формирования стока учитываются с помощью параметра ландшафтных условий n (рис. 5), который отражает способность деятельного слоя сбрасывать избыточную влагу под действием сил гравитации [Копысов, 2014; Ерофеев и др., 2018]. Параметр n является информативной интегральной гидрографической характеристикой речных водосборов и бессточных территорий. Расчет параметра производится на основе ранее рассчитанного индекса потенциальной влажности [Pourali et al., 2016].

Климатический (местный) сток был рассчитан по модели ГКР (1) на основе полученных ранее значений испарения с поверхности, теплоэнергетических ресурсов испарения, суммарного увлажнения и параметра ландшафтных условий стока, используя данные климатического реанализа (WorldClim) и

ЦМБ ArcticDEM (рис. 6). В отличие от реального (русового) стока, интегрирующего местный сток в виде русловой сети, под местным стоком понимается величина среднего многолетнего стока, определяемая как разность средних многолетних величин осадков и испарения на конкретной территории. В условиях избыточного увлажнения величина испарения стремится к водному эквиваленту тепло-

энергетических ресурсов испарения. Исходные данные по ежедневным осадкам и температурам воздуха с октября 1966 по 2018 г., среднее по метеостанции Надым и Тарко-Сале взяты из базы данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных ВНИГМИ-МЦД [Bulygina et al., 2020].

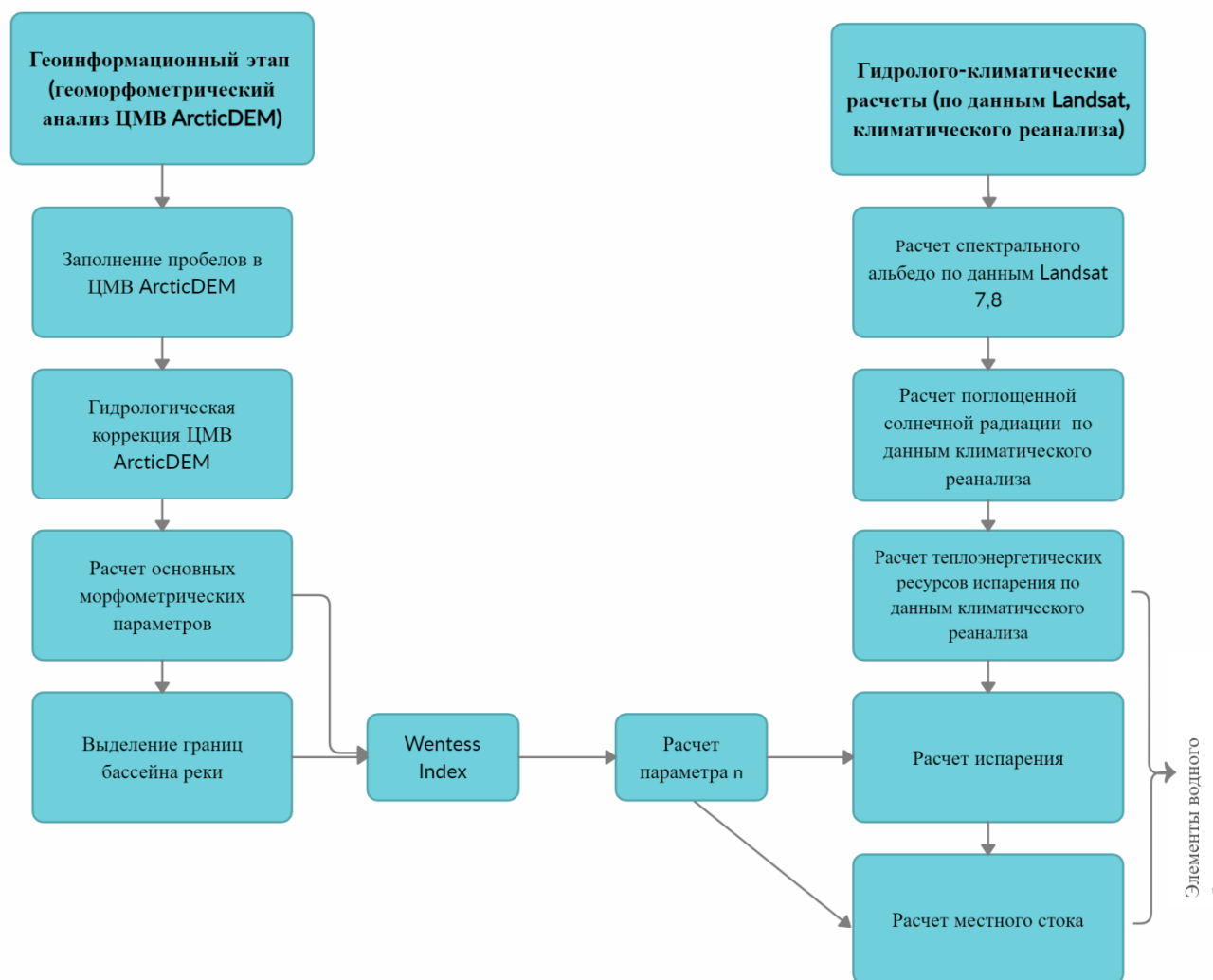


Рис. 2. Блок-схема этапов моделирования основных элементов водного баланса водосборного бассейна

Fig. 2. Diagram of stages of the basic elements of the water budget modelling

Таблица 4

Сравнение основных характеристик космических снимков Landsat, используемых для расчета спектрального альbedo

Table 4

Comparison of the main characteristics of the Landsat satellite images are used to calculate the spectral albedo

Сенсор	Дата	Время (местное)	Яркость			Спектральное альbedo		
			мин	сред	макс	мин	сред	макс
Landsat 7	01.07.2010	11:14	0,09	0,08	0,07	0,06	0,08	0,21
Landsat 8	20.07.2015	11:28	0,32	0,28	0,26	0,25	0,27	0,59

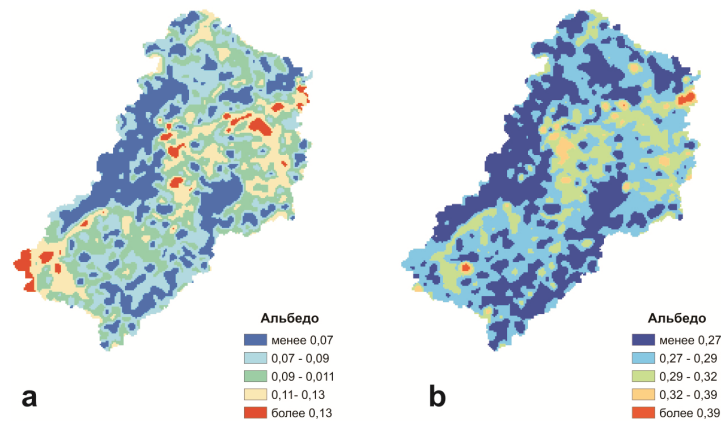


Рис. 3. Альbedo земной поверхности, рассчитанное на основе данных Landsat 8

a – для космического снимка, полученного 1.07.2010 г.; *b* – для космического снимка, полученного 20.07.2015 г.

Fig. 3. Albedo of the Earth surfaces is calculated with Landsat 8

a – for the satellite image with data acquisition 1st of July 2010; *b* – with data acquisition 20 of July 2015

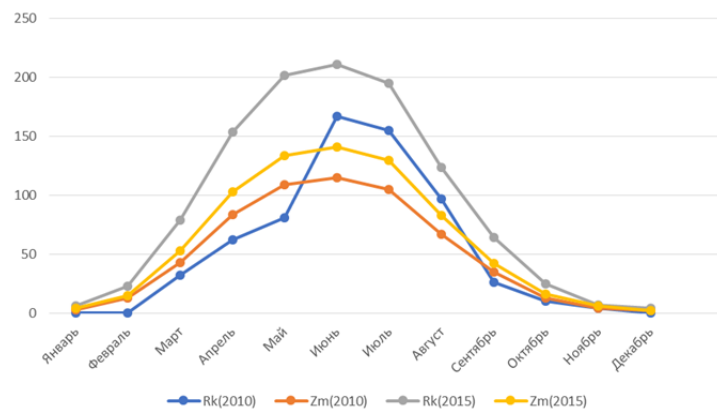


Рис. 4. График расчета теплоэнергетических ресурсов (мм) и поглощенной радиации (вт/м²) за 2010 и 2015 гг.

Fig. 4. Calculation of heat and power resources (mm) and absorbed radiation (w/m²) for 2010 and 2015

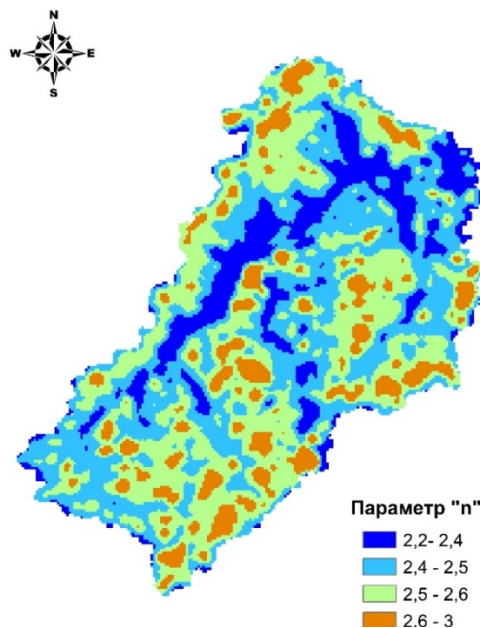


Рис. 5. Распределение параметра ландшафтных условий формирования стока *n* в бассейне реки Седяхи

Fig. 5. Distribution of the parameter of landscape conditions of runoff formation *n* into the River Sedeyaha catchment basin

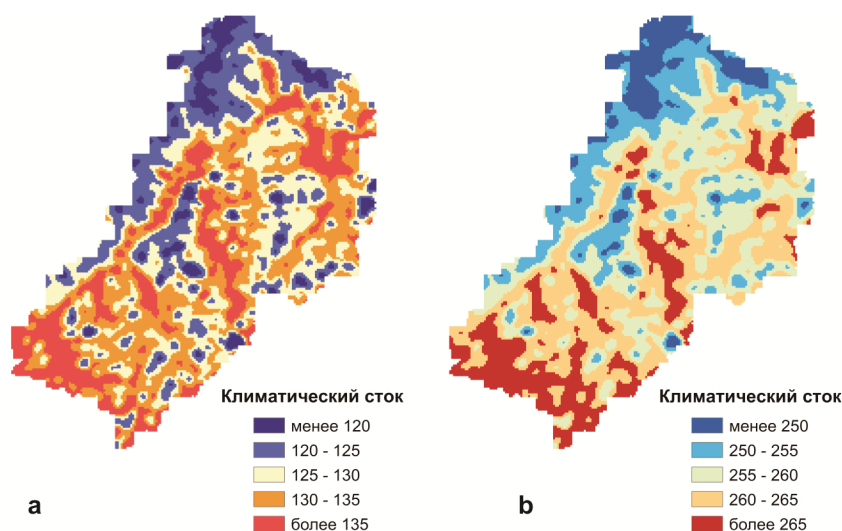


Рис. 6. Распределение климатического стока в бассейне реки Седяхи за 2010 (а) и 2015 (б)

Fig. 6. Distribution of the climatic runoff on the River Sedeyaha catchment basin for 2010 (a) and 2015 (b)

Обсуждение результатов

В условиях слабой гидрологической изученности, свойственной удаленным территориям севера Западной Сибири, важное значение приобретают новые методы учета пространственно-временной динамики элементов гидрологического цикла. Развитие технологий дистанционного зондирования позволяет получать все более разнообразную информацию о структуре, динамике и функционировании геосистем. Для их полноценного использования требуется разработка современных методик, рассматривающих процессы гидрологического цикла на

уровне деятельной поверхности интегрально, а не по отдельности.

За рассмотренный нами период (с 1967 по 2016 г.) самым холодным и сухим на данной территории является 1969 г., в то время как аномально жарким и сухим – 2016 г. (рис. 7), в котором были отмечены вспышки сибирской язвы и многочисленные пожары в тундре. Средняя величина теплоэнергетических ресурсов испарения (испаряемости Z_m) за полвека выросла на 22 %. Также на рис. 7 видно, что за расчетный период среднегодовые значения осадков увеличились на 130 мм (22 %), местный климатический сток – на 65 мм (24 %).

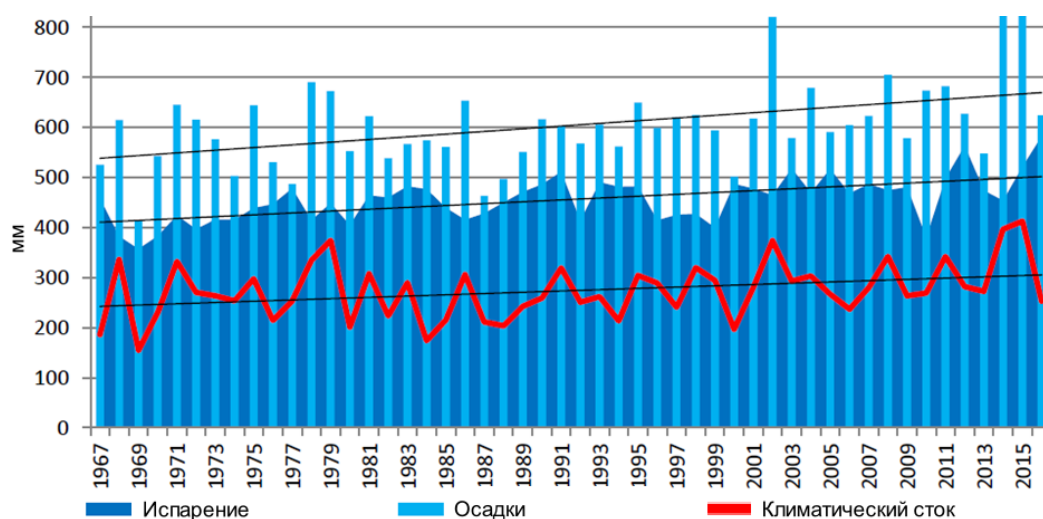


Рис. 7. Многолетний ход водного эквивалента теплоэнергетических ресурсов испарения, осадков и климатического стока

Fig. 7. Long-term variation of the potential evaporation, precipitation and climatic runoff

Внутригодовое распределение испаряемости на территории бассейна отличается неравномерностью. Так, 81 % всех затрат приходится на летние месяцы: 37 % на июль, 23 и 21 % на июнь и август соответственно. На май и сентябрь приходится только 7 и 9 %.

При расчете спектрального альбедо по данным спектральных каналов Landsat 7 и 8 для 1 июля 2010 г. и 20 июля 2015 г. наблюдаются существенные различия в распределении показателей (см. рис. 3). В первую очередь это может быть связано с изменением яркости пикселей изображения, появление которых вызвано погодными условиями и условиями освещения в момент съемки. В связи с этим при сравнительном анализе спектрального альбедо по разновременным снимкам можно рекомендовать пользоваться лишь относительными величинами.

Дальнейшее развитие описанной в работе методики может быть связано с использованием данных климатического реанализа с более точным временным и пространственным разрешением. Другим перспективным направлением является разработка блока трансформации климатического стока в гидрометрический сток, а также разделение суммарного стока на генетические (или структурные) составляющие в модели ГКР.

Заключение

С использованием метода ГКР и геоморфометрического анализа цифровой модели высот ArcticDEM

в работе рассчитаны GRID-матрицы и построены карты со среднемноголетними значениями элементов водного баланса для бассейна реки Седэяхи, расположенной в лесотундровой зоне севера Западной Сибири.

Выявлено, что вклад теплоэнергетических ресурсов испарения в функционирование лесотундровых геосистем весьма значителен в силу эффекта «запирающего» воздействия многолетней мерзлоты на водообмен в деятельном слое с грунтовыми водами. Основываясь на полученных результатах, было показано, что рост испаряемости на 19 % приводит к уменьшению стока почти в 2 раза. Результаты моделирования верифицированы на малом лесотундровом водосборе, расположенном в верховьях бассейна реки Седэяхи с использованием автоматических измерительных устройств.

Основываясь на проведенных расчетах, в данной работе была продемонстрирована возможность моделирования гидрологического цикла бассейна реки Седэяхи. Как оказалось, роль теплоэнергетических ресурсов испарения в функционировании лесотундровых геосистем с избыточной увлажненностью является определяющей. Такое действие обусловлено наличием многолетнемерзлых пород, блокирующих водообмен в деятельном слое с грунтовыми водами.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки, проект № 0721-2020-0041.

ЛИТЕРАТУРА

- Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Омск : Омская картографическая фабрика, 2004. 304 с.
- Бобрик А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Дроздов Д.С., Пономарева О.Е. Вклад абиотических факторов в пространственное варьирование эмиссии CO₂ почв лесотундровой зоны Западной Сибири (Новый Уренгой) // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI, № 2. С. 52–59.
- Голубятников Л.Л., Заров Е.А., Казанцев В.С., Филиппов И.В., Гаврилов Г.О. Анализ ландшафтной структуры ландшафтов тундровой зоны Западной Сибири на основе спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. 2015. № 3. С. 4–14.
- Гушля А.В., Мезенцев В.С. Водно-балансовые исследования. Киев : Вища школа, 1982. 229 с.
- Действующие метеорологические станции сети Росгидромета. URL: http://www.aari.aq/default_ru.html (дата обращения: 02.11.2020).
- Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Никифоров А.Н. Ландшафтно-геофизический подход к зонированию структуры землепользования на малом водосборе // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 6. С. 39–47.
- Ерофеев А.А. Ландшафтно-экологический анализ бассейнов малых рек на основе геоинформационного моделирования (на примере малых рек Томска и его окрестностей) : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2012. 16 с.
- Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Локтионова Т.А. Пространственно-временная динамика элементов гидрологического цикла репрезентативных водосборов рек равнинной и высокогорной Арктики // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020622173 от 06.11.2020.
- Калинин Н.А., Шкляев В.А., Исаков С.В. Применение данных спутников Landsat для определения динамики изменения структуры землепользования и дифференциального альбедо территории // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 7. С. 530–536.
- Карнацевич И.В., Хрущев С.А. Компьютерная система массовых расчетов текущих водных балансов речных водосборов неизученных областей суши. Омск, 2014. 176 с.
- Кашменская О.В., Земцов А.А. Рельеф Западно-Сибирской равнины. Новосибирск : Наука, 1988.
- Копысов С.Г. Параметрический учет ландшафтных условий стока в методе гидролого-климатических расчетов // ГИПР. 2014. № 3. С. 157–161.
- Коновалов В.Г., Рудаков В.А. Возможности использования данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга ледников и гляциологических расчетов // Лед и Снег. 2015. № 1 (129). С. 15–27.
- Мезенцев В.С. Гидрологические расчеты в мелиоративных целях. Омск: Изд-во Омского СХИ, 1982. 80 с.

Павлова Т.В., Катцов В.М. Ожидаемые изменения осадков и испарения в Арктике в 21-м веке. Результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей. CMIP5 // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2015. Вып. 579. С. 29.

Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 10.11.2020).

ArcticDEM. URL: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem> (дата обращения: 09.03.2020).

Bui M.T., Lu J., Nie L. A Review of Hydrological Models Applied in the Permafrost-Dominated Arctic Region // *Geosciences*. 2020. № 10. P. 401.

Beven K.J., Kirkby M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology // *Hydrological Science Bulletin*. 1979. № 24. P. 43–69.

Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Alexandrova T.M. Description of daily air temperature and precipitation data set from Russian meteorological stations and from some meteorological stations over the former USSR territory (TTTR). URL: <http://meteo.ru/english/climate/descrip11.htm> (дата обращения: 17.03.2020).

Earth Explorer: United States Geological Survey (USGS). URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *International Journal of Climatology*. 2017. V. 37. P. 4302–4315.

Fabre C., Sauvage S., Tananaev N., Srinivasan R., Teisserenc R., Sánchez Pérez J.M. Using Modeling Tools to Better Understand Permafrost Hydrology // *Water*. 2017. No 9. P. 418.

Kopysov S.G., Erofeev A.A., Zemcov V.A. Estimation of water balance over catchment areas taking into account the heterogeneity of their landscape conditions // *International Journal of Environmental Studies*. 2015. Vol. 72. No 3. P. 380–385.

Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: I Algorithms // *Remote Sens. Environ.* 2000. № 76. P. 213–238.

Pourali S.H., Arrowsmith C., Chrisman N. et al. Topography Wetness Index Application in Flood Risk-Based Land Use Planning // *Appl. Spatial Analysis*. 2016. No 9:39. P. 39–54. URL: <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2> (дата обращения: 10.11.2020).

Satellite Image Analysis and Terrain Modelling. A practical manual for natural resource management, disaster risk and development planning using free geospatial data and software. Version 2. SAGA GIS 4+. 2020. URL: https://sagatutorials.files.wordpress.com/2016/02/saga_manual_english_cdu_june_2017.pdf (дата обращения 10.11.2020).

Авторы:

Локтионова Тамара Андреевна, инженер, проблемная научно-исследовательская лаборатория гляциоклиматологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: taamaralok@gmail.com

Ерофеев Александр Анатольевич, заведующий проблемной научно-исследовательской лабораторией гляциоклиматологии, Геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: erofeev@yandex.ru

Копысов Сергей Геннадьевич, ведущий научный сотрудник, лаборатория мониторинга лесных экосистем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия; доцент, кафедра гидрологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: wosypok@mail.ru

Geosphere Research, 2020, 4, 121–132. DOI: 10.17223/25421379/17/10

T.A. Loktionova¹, A.A. Erofeev¹, S.G. Kopysov^{1,2}

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

MODELLING OF THE SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF HYDROLOGICAL CYCLE ELEMENTS OF THE SEDEYAKHA CATCHMENT ON THE BASIS OF HCC MODEL

This article presents and briefly discusses results and methodic of the modeling of annual average values of spatio-temporal dynamics of the elements of hydrological circle distribution on the Sedeyakha catchment. The study site is located on the north of Western Siberia (Yamalo-Nenets Autonomous Okrug), has an area of 1310 km², and belongs to the forest-tundra geobotanical zone.

The methodology of the research is based on the using of the Hydroclimatology Calculation (HCC) method in combination with the modeling of moisture and insolation conditions through SAGA software package.

For the accounting of spatial heterogeneity of runoff formation, the geomorphometry analysis was carried out for the whole catchment. Heat and energy resources of evaporation were modeled by parameters of spectral albedo, which is available through Landsat 7 and Landsat 8 satellite images. Calculations were performed for the years with contrasting temperature and precipitation conditions (for July 2010 and July 2015).

GIS-based modeling included two stages and several sequential operations with DEM: 1) downloading of the ArcticDEM; 2) geometric correction (spatial reference); 3) hydrological correction (filling sinks on the terrain model for simulation of surface runoff); 4) calculation of channel network and delineation of catchment subbasins; 5) calculation of the catchment basin boundaries of the River Sedeyakha; 6) calculation of Wetness Index.

For the studied period (from 1967 to 2016), the coldest and driest year for the River Sedeyakha basin was 1969. The abnormally hot and the driest year is 2016. That year there have been outbreaks of anthrax and numerous fires in the tundra.

The average value of heat and energy resources of evaporation (Zm) for half a century has increased by 22 %. The amount of precipitation increased by 130 mm (22 %), which led to an acceleration of a climatic runoff by 65 mm (24 %).

It was revealed that the contribution of heat and energy resources of evaporation for the functioning of forest-tundra geosystems is very significant due to the "locking" effect of permafrost on water exchange with groundwater in the active layer. The increase of evaporation by 19 % leads to the decrease of runoff by almost two times. The results of the simulation were verified on a small forest-tundra catchment by data loggers.

Keywords: *landscape, runoff, climate, permafrost, topography.*

References

- Atlas Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga* [Atlas of the Yamalo-Nenets Autonomous area]. Omsk: Omsk cartographic factory. 2004. 304 p. In Russian
- Bobrik A.A., Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Drozdov D.S., Ponomareva O.E. *Vklad abioticheskikh faktorov v prostranstvennoe var'irovanie emissii SO₂ pochv lesotundrovoy zony Zapadnoj Sibiri (Novyy Urengoy)* [Contribution of abiotic factors to spatial variation of CO₂ emission in soils of the forest-tundra zone of Western Siberia (Novy Urengoy)] // *Earth's Cryosphere*. 2017. XXI. No 2. pp. 52–59. In Russian
- Golubyatnikov L.L., Zharov E.A., Kazantsev V.S., Filippov I.V., Gavrilov G.O. *Analiz landshaftnoj struktury landshaftov tundrovoy zony Zapadnoj Sibiri na osnove sputnikovyykh dannykh* [Analysis of the landscape structure of tundra landscapes in Western Siberia based on satellite data] // *The study of the Earth from space*. 2015. pp. 4–14. In Russian
- Gusla A.V., Mezentsev V. S. *Vodno-balansovye issledovaniya* [Water-balance studies]. Kiev: Vyshcha SHKOLA. 1982. 229 p. In Russian
- Deistvuyushchie meteorologicheskie stancii seti Rosgidrometa* [Operating weather stations of the Roshydromet network]. Available at: http://www.aari.aq/default_ru.html. Date accessed 02.11.2020. In Russian
- Erofeev A.A., Kopysov S.G., Nikifonov A. *Landshaftno-geofizicheskij podhod k zonirovaniyu struktury zemlepol'zovaniya na malom vodoshore* [Landscape geophysical approach to zoning of land use structure at small catchment] // *The University of Tomsk Polytechnic*. 2018. V. 329. No 6. pp. 39–47. In Russian
- Erofeev A.A. *Landshaftno-ekologicheskyy analiz basseynov malyykh rek na osnove geoinformatsionnogo modelirovaniya (na pri mere malyykh rek Tomska i ego okrestnostey). Avtoreferat Dis. Kand. nauk* [Landscape and ecological analysis of small rivers watersheds on the basis of GIS-based modelling. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2012. p. 16. In Russian
- Erofeev A.A., Kopysov S.G., Loktionova T.A. *Prostranstvenno-vremennaya dinamika elementov gidrologicheskogo cikla reprezentativnykh vodosborov rek ravninnoj i vysokogornoj Arktiki* [Spatial and temporal dynamics of elements of the hydrological cycle of representative river catchments in the lowland and high-mountain Arctic] // *Certificate of state registration of the database № 2020622173*. 06.11.2020. In Russian
- Kalinin N.A., Shklyaev V.A., Isakov S.V. *Primenenie dannykh sputnikov Landsat dlya opredeleniya dinamiki izmeneniya struktury zemlepol'zovaniya i differentsial'nogo al'bedo territorii. Optika atmosfery i okeana* [Use of Landsat data to determination of the dynamics of landuse change and differential albedo] // *Atmospheric and Oceanic Optics* 31, No 7. pp. 530–536. In Russian
- Karnatsevich I.V., Khrushev S.A. *Kompiuternaya sistema massovykh raschetov teknyshikh vodnykh balansov rechnykh vodosborov neizuchennykh oblastei sushi: monografiya* [Computer system of mass calculations of current water balance of river basins of unexplored land areas: monograph]. Omsk. 2014. Izdatelstvo. p. 176. In Russian
- Kasiminskaya O. V., Zemtsov A. A. *Rel'ef Zapadno-Sibirskoi ravniny* [The Relief of the West Siberian plain] // "Science" Siberian branch. 1988. In Russian
- Kopysov S.G. *Parametricheskii uchet landshaftnykh uslovii stoka v metode gidrologo-klimaticheskikh raschetov* [Parametric account of landscape conditions of flow in the method of hydrology climatic calculations] // *Geografiya i prirodnye resursy* 2014, No 3. pp. 157–161. In Russian.
- Kopysov S.G., Erofeev A.A., Zemcov V.A. Estimation of water balance over catchment areas taking into account the heterogeneity of their landscape conditions // *International Journal of Environmental Studies*. 2015. Vol. 72. No 3. pp. 380–385.
- Konovalov V.G., Rudakov V.A. *Vozmozhnosti ispol'zovaniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya monitoringa lednikov i glaciologicheskikh raschyotov* [Possibilities of Using earth remote sensing data for glacier monitoring and glaciological calculations] // *Ice and Snow*. 2015. No 1 (129). pp. 15–27. In Russian
- Mezentsev V.S. *Gidrologicheskie raschety v meliorativnykh tselyakh* [Hydrological calculations for melioration]. Omsk, Omsk Agricultural Institute Publ., 1982. P.80. In Russian
- Pavlova T.V., Kattsov V.M. *Ozhidaemye izmeneniya osadkov i ispareniya v Arktike v 21-m veke. Rezul'taty raschetov s pomoshch'yu ansamblya global'nykh klimaticheskikh modelej. CMIP5* [Expected changes in precipitation and evaporation in the Arctic in the 21st century. Results of calculations using an ensemble of global climate models. CMIP5] // *Proceedings Of the main geophysical Observatory of A. I. Voeikov*. 2015. pp. 29. In Russian
- Specializirovannyye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy* [Specialized data for climatic research]. Available at: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (date accessed 10.11.2020). In Russian
- ArcticDEM. Available at: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>. No 3. pp. 4–14. Date accessed: 09.03.2020.
- Bui M.T., Lu J., Nie L. A Review of Hydrological Models Applied in the Permafrost-Dominated Arctic Region // *Geosciences* 2020. 10. p. 401.
- Beven K.J., Kirkby M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology // *Hydrological Science Bulletin*, 1979, No 24, pp. 43–69.
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. Description of daily air temperature and precipitation data set from Russian meteorological stations and from some meteorological stations over the former USSR territory (TTTR). Available at: <http://meteo.ru/english/climate/descrip11.html>. Date accessed: 17.03.2020. In Russian
- Earth Explorer: United States Geological Survey (USGS) Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *International Journal of Climatology*. 2017. V. 37. pp. 4302–4315.
- Fabre C., Sauvage S., Tananaev N., Srinivasan R., Teisserenc R., Sánchez Pérez J.M. Using Modeling Tools to Better Understand Permafrost Hydrology. *Water* 2017, 9, 418 p.

Kopysov S.G., Erofeev A.A., Zemcov V.A. Estimation of water balance over catchment areas taking into account the heterogeneity of their landscape conditions // *International Journal of Environmental Studies*. 2015. Vol. 72. No 3. pp. 380–385.

Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: I Algorithms // *Remote Sens. Environ.* 2000. No 76. pp. 213–238.

Pourali S.H., Arrowsmith C., Chrisman N. et al. Topography Wetness Index Application in Flood Risk-Based Land Use Planning // *Appl. Spatial Analysis*. 2016. No 9:39. pp. 39–54. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2>. Date accessed 10.11.2020.

Satellite Image Analysis and Terrain Modelling. A practical manual for natural resource management, disaster risk and development planning using free geospatial data and software. Version 2. SAGA GIS 4+. 2020. Available at: https://sagatutorials.files.wordpress.com/2016/02/saga_manual_english_cdu_june_2017.pdf (date accessed 10.11.2020).

Author's:

Loktionova Tamara A., Engineer, Laboratory of Glacioclimatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: taamaralok@gmail.com

Erofeev Alexander A., Cand. Sci. (Geography), Head of the Laboratory of Glacioclimatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: erofeew@yandex.com

Kopysov Sergey G., Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, Laboratory of Forest Ecosystem Monitoring, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia; Associate Professor, Department of Hydrology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: wosypok@mail.ru