

ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНОГО БАЛАНСА ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А.О. Елисеев^{1, 2}, С.Г. Копысов^{2, 1}

E-mail: EAO_sibgidro@bk.ru, wosypok@mail.ru

¹ ФГАОУ ВО «*Национальный исследовательский Томский государственный университет*», г. Томск, Россия

² ФГБУН «*Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук*», г. Томск, Россия

АННОТАЦИЯ: Представлена методика ландшафтно-экологического моделирования водного баланса для юго-востока Западной Сибири. Данная методика позволяет оценить влияние различных видов землепользования на структуру водного баланса. Для всех составляющих водосбор элементов ландшафта (стокоформирующих комплексов) характерны конкретные физико-географические условия, основные из которых климат, рельеф и почвенно-растительный покров. Совокупность этих условий определяет особенности структуры водного баланса и гидрологического режима территории. Знание структуры водного баланса дает представление о возможностях использования водных ресурсов различных географических зон.

В моделировании использован генетический метод формирования стока или метод гидролого-климатических расчетов, реализованный на основе ландшафтно-гидрологического подхода в общедоступной геоинформационной системе. Исходными данными для моделирования являются цифровая модель рельефа, данные спутникового зондирования и климатические характеристики. Система уравнений описывает процессы формирования местного климатического элементарного стока, изменение влажности почвы и испарение с поверхности водосборов с достаточной для многих практических целей точностью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водный баланс, Западная Сибирь, метод гидролого-климатических расчетов, ландшафтно-экологическое моделирование, потенциал заболачиваемости, климатический сток.

Главной целью ландшафтно-экологического моделирования водного баланса является отображение структурно-динамической организации ландшафтного пространства и оценка влияния различных ландшафтов на структуру водного баланса. Интенсивность процессов увлажнения территории, просачивания осадков, сбегания их по поверхности зависит от со-

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ФЦП RFMEFI61419X0002

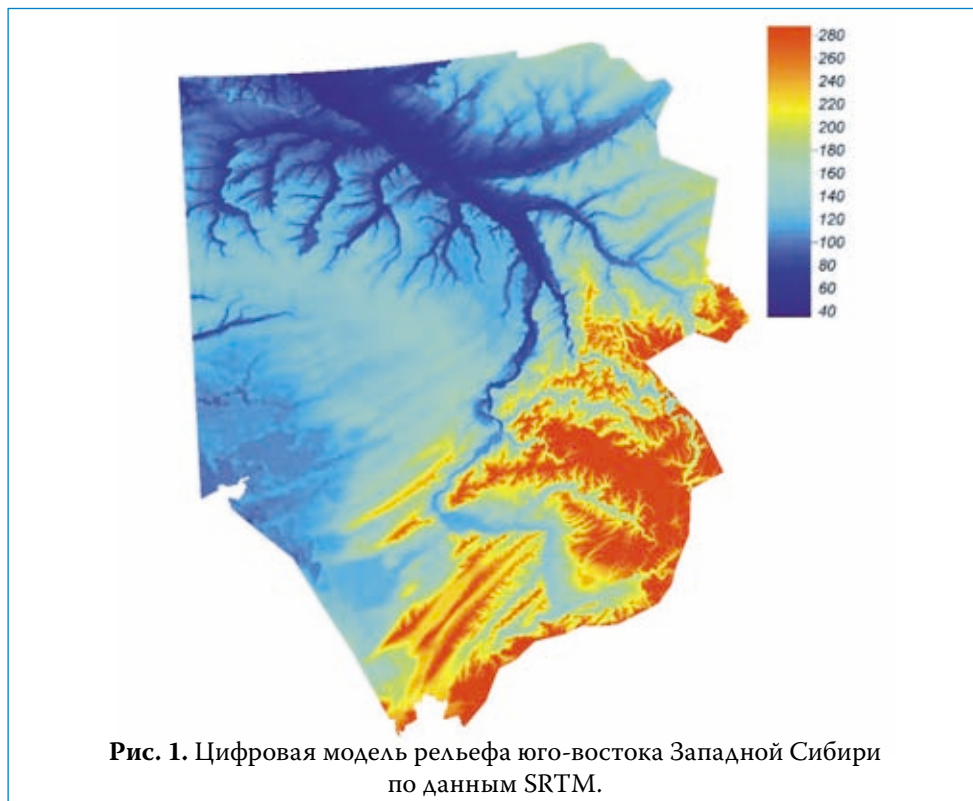
© Елисеев А.О., Копысов С.Г., 2020

четания физико-географических факторов, сложившихся на территории в данный момент времени. Многообразие природных факторов дополняется антропогенным изменением территории в результате хозяйственной деятельности, что делает решение данной задачи более многовариантным [1].

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА

Для ландшафтно-экологического моделирования водного баланса в данной работе использован генетический метод формирования стока или метод гидролого-климатических расчетов, разработанный В.С. Мезенцевым. Система уравнений метода гидролого-климатических расчетов (ГКР) представляет наиболее общую и универсальную, с точки зрения использования для любого расчетного интервала времени, математическую модель процессов преобразования влаги на уровне деятельной поверхности водосборов любой территории [2]. Выбор метода ГКР обусловлен почти полным отсутствием точных и систематизированных исходных данных для более детального геомоделирования.

Рассматриваемая территория Западной Сибири представлена на рис. 1.



Ландшафтный анализ территории производился на основе данных следующих источников:

- по данным цифровой модели рельефа (ЦМР). Для рассматриваемой территории Западной Сибири наиболее актуальным источником является SRTM матрица с пространственным разрешением 30 м (1 arc-sec) [3]. По данным ЦМР можно определить морфометрические и гидрологические характеристики;

- по данным дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Для оценки антропогенного использования земель и определения типов биомов лесов на основе данных спутника Landsat 8 OLI [3]. В рамках проведенного исследования для анализа использована комбинация каналов 7–5–3, позволяющая выделить типы растительности на заданной территории. Используются дневные сцены за летний период (июнь, июль) с наименьшей облачностью (менее 10 %), т. к. летний период оптимален для дешифрирования ландшафтов. Предварительно в ГИС Saga было улучшено разрешение с 30 м до 15 м с помощью модуля «Color Normalized Brovey Sharpening» с использованием панхроматического спектрального канала. Коррекция данных по спектральным каналам осуществлялась в модуле «Top of Atmosphere Reflectance». Классификация по типам растительности – в модуле «K-Means Clustering for grids».

Для анализа климатических данных использован реанализ WorldClim, основанный на регулярных метеорологических наблюдениях, аэрологической и спутниковой информации в сетке 0,5 x 0,5° с января 1970 г. по 2000 г. [4]. Для оценки водных ресурсов применен генетический метод формирования стока или метод гидролого-климатических расчетов (ГКР), разработанный В.С. Мезенцевым [5, 6]. 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 результате расчетов по методу ГКР получают поля следующих характеристик за расчетный интервал времени (месяц) [7]: теплоэнергетические ресурсы испарения; максимально возможное испарение; затраты теплоэнергетических ресурсов на таяние снега и сезонной мерзлоты; суммарное увлажнение; запасы влаги в деятельном слое почвогрунтов в начале и в конце расчетного интервала времени; испарение; слой стока.

Климатический сток определяется по формуле:

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

где Z – испарение с поверхности суши, мм;

Z_M – водный эквивалент теплоэнергетических ресурсов испарения, мм;

n – параметр ландшафтных условий, отражающий геоморфологические условия формирования стока и способность деятельного слоя сбрасывать избыточную влагу под действием сил гравитации;

H – суммарное увлажнение, мм.

Все расчеты производились в калькуляторе растров в ГИС SAGA [8]. Исходные данные (осадки, температура) взяты из реанализа WorldClim [4]. Для расчета параметра ландшафтных условий n [9] использован индекс потенциальной влажности (*Wetness Index* – W_T), выделяемый автоматически на основе ЦМР – SRTM с пространственным разрешением 30 м (1 arc-sec) в ГИС SAGA [8].

Для перехода от TWI к параметру n применена формула [9]:

$$n = 1,1 + \frac{TWI}{6,1}. \quad (2)$$

Параметр n является информативной интегральной гидрографической характеристикой речных водосборов, позволяющей выполнять ландшафтно-экологическое моделирование [10].

Для учета отрицательных температур и высоты снежного покрова использованы данные реанализа WorldClim. Высота снежного покрова (м) определялась по формуле:

$$h_c = \mu \cdot (KX_{\text{ЗИМ}} - Z_{\text{ЗИМ}}), \quad (4)$$

где $KX_{\text{ЗИМ}}$ – сумма осадков за зимний период, мм; $Z_{\text{ЗИМ}}$ – суммарное испарение за зимний период, (мм); μ – параметр, определяемый в зависимости от типа ландшафта (в среднем составляет 0,05).

Расчет суммарного увлажнения (H) для отдельных месяцев производили с учетом изменения влагосодержания в деятельном слое. Изменение относительной (в долях от наименьшей влагоемкости, $V = W/HB$) влажности деятельного слоя ($V_{1,2}$) определяли по следующим формулам [6]:

$$V_2 = ((r + 1) \cdot V_{\text{cp}} - V_1)/r, \quad (5)$$

$$V_{\text{cp}} = [(KX/HB + V_1)/(Z_M/HB + V_1^{1-r})]^{1/r}, \quad (6)$$

где HB – наименьшая влагоемкость деятельного слоя;

V_1 – относительная влажность на начало расчетного периода;

V_2 – относительная влажность на конец расчетного периода;

V_{cp} – среднемесячное значение относительной влажности;

r – параметр, характеризующий способность почвогрунтов подводить влагу к испаряющей поверхности и расходовать ее на испарение, который зависит от механического состава и засоленности деятельного слоя.

В процессе торфонакопления и роста лесной подстилки образуются органогенные горизонты, нивелирующие различия в значениях параметра r от механического состава. Поэтому расчет параметра r на основе цифрово-

го почвенного реанализа TAxNWRB с разрешением 250 м [11] не дает корректных результатов. В связи с этим можно принимать среднее значение параметра $r = 1,9$.

Расчет наименьшей влагоемкости деятельного слоя (НВ) производили по зависимости, отражающей связь водно-физических процессов в деятельном слое [12]:

$$\text{НВ} = \left(\frac{r - 0,15}{0,004} \right) \cdot \exp \left(- \frac{0,693}{n} \right). \quad (7)$$

Теплоэнергетические ресурсы испарения (Z_M) рассчитывали с учетом коэффициента освещенности (V_s – Visible sky) в % определяемого в модуле «Sky View Factor»:

$$Z_m = E_{vp} \cdot \exp \left(\frac{V_s}{100} \right), \quad (8)$$

где E_{vp} – испаряемость поверхности и испаряемости, рассчитанной по минимальной, средней и максимальной температуре по данным реанализа WorldClim в модуле «Tool ETpot (after Hargreaves, Grid)» в ГИС Saga.

К климатическим теплоэнергетическим ресурсам апреля и мая вводили поправку на таяние снега и сезонной мерзлоты [6]:

$$\Delta Z_M = \frac{0,167 \cdot \sum(t < 0\text{C}^\circ)}{h_c + 0,2}, \quad (3)$$

где $\sum(t < 0\text{C}^\circ)$ – сумма отрицательных температур за зимний период; h_c – высота снежного покрова на начало снеготаяния, м.

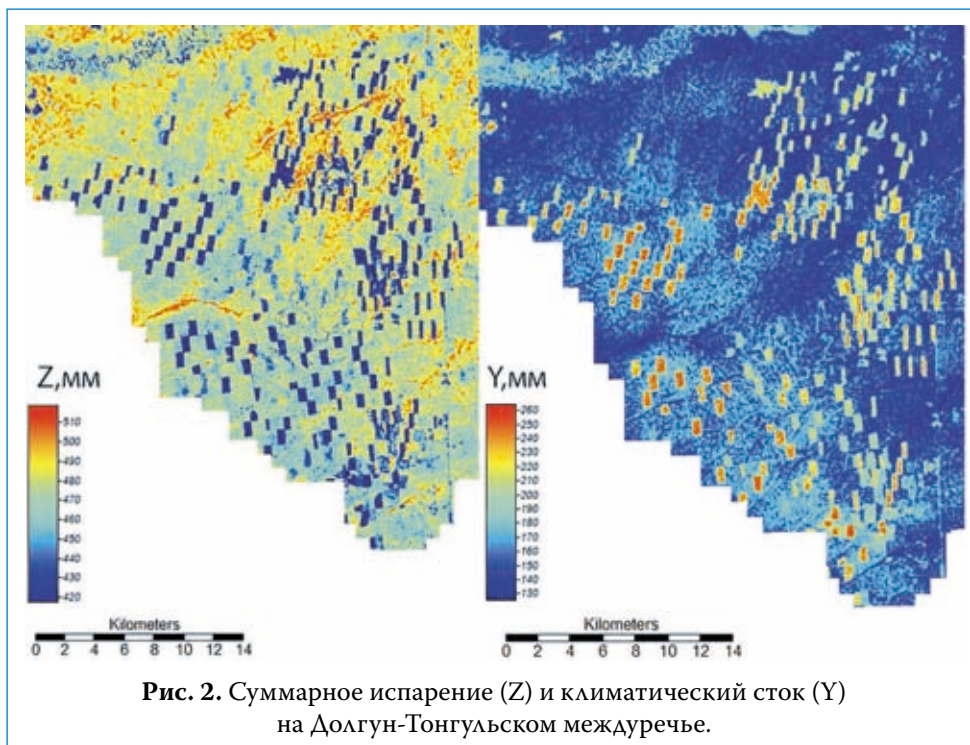
При расчете суммарного увлажнения за период снеготаяния (апрель, май) к текущим исправленным осадкам (КХ) прибавляли осадки, накопленные за зимний период (ноябрь–март) за вычетом зимнего испарения. Долю поправки на таяние снега и сезонной мерзлоты для апреля определяли пропорционально возможному слою стаивания снега в апреле (остаток переносили на май).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние вырубki леса на водный баланс

В настоящее время на космических снимках Сибири, к сожалению, зафиксированы огромные массивы сплошных вырубок леса. Возникает вопрос, как такое антропогенное воздействие меняет структуру водного баланса? Считается, что на сплошных вырубках кардинально меняется интенсивность биологических, гидрофизических и гидрологических процессов, поэтому такие рубки следует относить к основным факторам, определяющим формирование количественных характеристик стока и химического состава стекающей с водосбора воды [13]. Для оценки изменения стока после сплошных рубок в данной работе использована описанная выше методика расчета водного баланса.

При сравнительном анализе последствий сплошных вырубок на водосборе р. Четь в пределах Тегульдетского района (рис. 2) выявлено увеличение годового стока на 3–5 мм. Следует учесть, что на данный момент доля свежих, не заросших молодняком вырубок на данной территории не превышает 7 %. Средний размер вырубка составляет 50 га. Учитывая нынешние темпы рубок леса, уже через 5–10 лет доля вырубок может удвоиться и, соответственно, можно ожидать увеличение стока до 10 мм (5 %) за счет уменьшения испарения с вырубков. Непосредственно на вырубках суммарное испарение в среднем уменьшается на 25–30 % (30–40 мм), а климатический сток увеличивается до 50–60 % (25–70 мм).



Оценка потенциала заболачиваемости

Предрасположенность территории к заболачиванию обусловлена застоем воды при отсутствии условий для сброса излишней воды и недостатке теплоэнергетических ресурсов для ее испарения. Доля земель, предрасположенных к заболачиванию, отражает интегральную степень гидроморфности почвенного покрова, а также долю земель, на которых при недостаточности теплоэнергетических ресурсов для испарения избыточной влаги может развиваться процесс болотообразования.

Результаты проведенной оценки потенциала заболачиваемости для водосборов в различных природно-климатических условиях приведены в таблице. Потенциал заболачивания определялся как разность доли водосборов с значениями параметра ландшафтных условий стока n от 3 до 3,5. Значения параметра $n > 3,0$ % включают в себя все потенциально гидроморфные земли. Значения параметра $n > 3,3$ % включают в себя болота и заболоченные земли, а с $n > 3,5$ болота.

Таблица. Оценка потенциала заболачиваемости бассейнов рек

Бассейн	Параметр ландшафтных условий стока, n	Средняя высота водосбора, м	Уклон, ‰	Гидроморфные земли, %	Болота и заболоченные земли, %	Болота, %	Потенциал заболачивания, %
р. Латат – с. Ягодное	3,11	170	3,44	10,8	3	2,5	8,3
р. Берла – с. Берлинка	2,76	150	3,86	23,7	8,1	5	18,7
р. Большой Татош – с. Большой Татош	3,00	110	0,83	30	11,1	5	25
р. Бакчар – с. Польшнянка	3,09	140	0,65	58,6	33,4	14	44,6
р. Басандайка – д. Басандайка	2,57	175	3,44	8	3,2	1,4	6,6
р. Порос – с. Зоркальцево	2,98	135	2,65	25	9,86	5	20
р. Андарма – с. Панычево	2,83	130	0,37	39,7	20	7	32,7
р. Икса – с. Плотниково	2,97	120	0,36	53	31	10,8	42,2
р. Кучерла – с. Кучерла	2,20	2260	46,6	2,4	1,4	0,8	1,6

Для Западно-Сибирской равнины угроза заболачивания земель является распространенным геоэкологическим риском, ярко проявляющимся при дорожном строительстве. Оптимальная заболоченность речных бассейнов, с точки зрения снижения максимальных паводочных уровней воды в реках, должна составлять 20–70 %. Для поддержания допустимой степени заболоченности необходимо производить очистку гидрографической сети [14]. Для прилегающих горных (р. Кучерла) и предгорных (реки Басандайка и Латат) территорий Западной Сибири риск заболачивания не актуален.

ВЫВОДЫ

Представленный в рамках данной статьи методический подход по ландшафтно-экологическому моделированию водного баланса постоянно дорабатывается с учетом актуальных достижений современных информационных технологий: цифровой модели рельефа, данных дистанционного зондирования земли и реанализа.

Проведена количественная оценка влияния сплошных вырубок на водный баланс, пока только на примере Тегульдетского района Томской области. Для р. Четь уже через 5–10 лет доля вырубок может удвоиться и увеличение среднемноголетнего стока за счет вырубок может возрасти до 10 мм (5 %) в результате уменьшения испарения с вырубок. Непосредственно на вырубках суммарное испарение в среднем уменьшается на 25–30 % (30–40 мм), а климатический сток увеличивается до 50–60 % (25–70 мм). Такое изменение структуры водного баланса на участках, где значение параметра ландшафтных условий больше 3, способствует процессам заболачивания.

Оценка потенциала заболачиваемости, основанная на распределении параметра отражающего условия стока, показывает, что для Западно-Сибирской равнины угроза заболачивания земель является значимым геоэкологическим риском. Для хорошо дренируемых территорий Западной Сибири этот риск не столь актуален.

В дальнейшем на базе представленных разработок предполагается оптимизация структуры землепользования на основе бассейнового подхода для обеспечения устойчивого развития территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ерофеев А.А.* Определение структуры бассейновых геосистем на основе геоинформационного моделирования (на примере бассейнов малых рек Томска и его окрестностей) / А. А. Ерофеев // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 363. С. 192–195.
2. *Карнацевич И.В., Хрущев С.А.* Компьютерная система массовых расчетов текущих водных балансов речных водосборов неизученных областей суши. Омск: Изд-во ОмГПУ, 2014. 175 с.
3. EarthExplorer. Режим доступа: URL: earthexplorer.usgs.gov (дата обращения 25.01.2020).
4. *Fick S.E., Hijmans R.J.* WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 2017. Vol. 37. P. 4302–4315.
5. *Волчек А.А.* Компьютерное моделирование водного баланса малых рек Беларуси // Вестник Полоцкого государственного университета. 2007. № 6. С. 152–155.
6. *Мезенцев В.С., Карнацевич И.В.* Увлажненность Западно-Сибирской равнины. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 168 с.

7. Карнацевич И.В., Мезенцева О.В., Тусупбеков Ж.А., Бикбулатова Г.Г. Возобновляемые ресурсы тепловлагообеспеченности Западно-Сибирской равнины и динамика их характеристик. Омск: Изд-во Омского аграрного ун-та, 2007. 268 с.
8. SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) / The official SAGA website. Режим доступа: URL: <http://www.sagagis.org/en/index.html> (дата обращения 15.11.2019).
9. Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Никифоров А.Н. Ландшафтно-геофизический подход к зонированию структуры землепользования на малом водосборе // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 6. С. 39–47.
10. Копысов С.Г. Параметрический учет ландшафтных условий стока в методе гидролого-климатических расчетов // География и природные ресурсы. 2014. № 3. С. 157–161.
11. SoilGrids: global gridded soil information. Режим доступа: URL: <https://soilgrids.org> (дата обращения: 20.01.2020).
12. Копысов С.Г. Расчет элементов водного баланса гидроморфных ландшафтов по водно-физическим свойствам почвенного покрова // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 1. С. 26–30.
13. Карпечко Ю.В. Влияние рубок на сток с лесопокрытой части водосбора Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Лимнология. 2016. № 5. С. 13–20.
14. Копысов С.Г. Восстановление гидрографической сети водосборов – основной способ борьбы с заболачиванием водоразделов // Водное хозяйство России. 2010. № 5. С. 96–103.

Для цитирования: Елисеев А.О., Копысов С.Г. Ландшафтно-экологическое моделирование водного баланса юго-востока Западной Сибири // Водное хозяйство России. 2020. № 2. С. 102–117.

Сведения об авторах:

Елисеев Артем Олегович, инженер, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ), Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; аспирант, ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3; e-mail: EAO_sibgidro@bk.ru

Копысов Сергей Геннадьевич, канд. геогр. наук, доцент, кафедра гидрологии, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ), Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3; e-mail: wosypok@mail.ru

LANDSCAPE/ECOLOGICAL MODELLING OF WATER BALANCE OF THE WEST SIBERIA SOUTHEAST

Artem O. Eliseyev^{1,2}, Sergey G. Kopysov^{2,1}

E-mail: EAO_sibgidro@bk.ru, wosypok@mail.ru

¹ Tomsk National Research State University, Tomsk, Russia

² Institute of Climatic and Ecological Systems Monitoring of the Russian Academy of Sciences Siberian Branch, Tomsk, Russia

Abstract: The article presents the technique of landscape ecological modeling of water balance for the Southeast of Western Siberia. This technique enables to assess the impact of different types of land use on the structure of the water balance. For all elements of the landscape that make up the catchment area, i.e. surface complexes, characterized by their physical and geographical conditions, the main of them are the following: climate, topography, soil and vegetation. The combination of these conditions determines the features of structure of the water balance and hydrological regime of the territory. Knowledge of the structure of the water balance gives us an idea of the possibilities of using water resources of different geographical zones.

In modelling we used the genetic method of flow formation, or the method of hydrological-climatic calculations (HCC) developed by V. S. Mezentsev implemented on the basis of landscape-hydrological approach in public geographic information system (GIS). The initial data for modeling are the following: digital terrain model, satellite sensing data and climatic characteristics. The system of equations of the HCC method describes the processes of formation of local climatic elementary runoff, changes in soil moisture and evaporation from the surface of catchments with the accuracy, which is sufficient for many practical purposes. In this method, the physical and geographical factors of flow formation are taken into account by the parameter n (reflects the influence of landscape conditions) and r (characterizes the ability of the soil to supply moisture to the evaporating surface and spend it on evaporation).

Key words: water balance, Western Siberia, HCC method, SRTM, WorldClim, DEM, Saga GIS, swamping potential, climate runoff

Representation of the structural/dynamic arrangement of the landscape and assessment of the different landscapes impact on the water balance structure are the main objectives of the landscape/ecological modelling. Intensity of the territory moistening processes, precipitations transpiration, their flow along the surface depend on combination of physical/geographic factors acting on the territory at present moment. Multiplicity of natural factors is supplemented with anthropogenic altering of the territory resulted from economic activities, this making the above task solution more multivariable [1].

MATERIALS AND METHODS OF THE RESEARCH

For landscape/ecological modelling of water balance we in this work used the genetic method of the flow formation or the method of hydrological/climatic calculations developed by V.S. Mezentsev. The hydrological/climatic calculations (HCC) equation system is the most general and universal from the point of view of application for any calculated time interval mathematical model of processes of moisture transformation at any territory catchment active surface level [2]. The choice of HCC method is stipulated by nearly complete unavailability of precise and systematic initial data for more detailed geo/modelling.

Fig. 1. presents the Western Siberia territory under consideration.

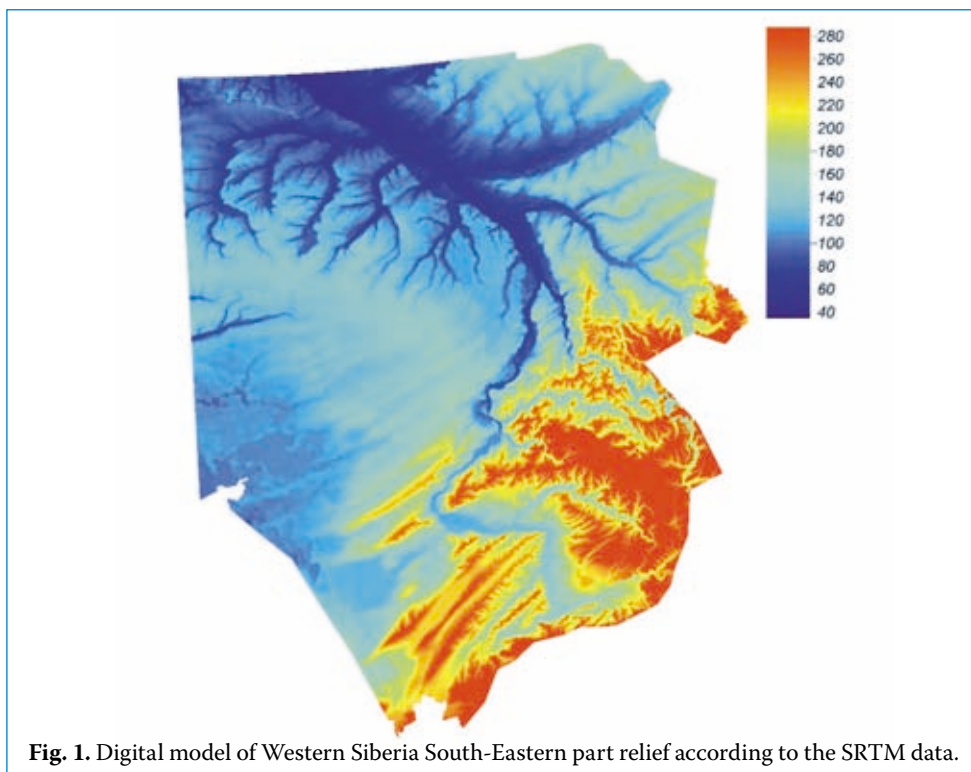


Fig. 1. Digital model of Western Siberia South-Eastern part relief according to the SRTM data.

The landscape analysis of the territory has been based on data from the following sources:

- the data according to the relief digital model (RDM). SRTM matrix with spatial resolution of 30 m (1 arc-sec) is the most relevant source for the Western Siberia territory [3]. According to the RDM data it is possible to determine morphometric and hydrological characteristics;

- the Earth remote sensing data – to assess anthropogenic use of land and determination of the forest biome type on the base of Landsat 8 OLI satellite data [3]. Within the framework of this research we used for the analysis the combination of canals 7–5–3, which enabled to single out types of vegetation on the preset territory. We used day scenes over the summer period (June and July) with the minimal cloudiness (less than 10 %), as the summer period is optimal for the landscapes deciphering. Prior to that in GIS Saga we improved resolution from 30 m to 15 m with “Color Normalized Brovey Sharpening” module using panchromatic spectral canal. The data correction through spectral canals was carried out in “Top of Atmosphere Reflectance” module. Classification against the types of vegetation was performed in “K-Means Clustering for grids” module.

To analyze the climatic data we used WorldClim reanalysis based on regular meteorological observations, aerological and satellite information in $0.5 \times 0.5^\circ$ grid from January 1970 to 2000. [4]. To estimate water resources we used genetic method of the flow formation or the method of hydrological/climatic calculations (HCC) developed by V.S. Mezentsev [5, 6]. The HCC model possesses the most number of parameters and enables with a scarce

net of observation posts to attract the model reanalysis data in respect of air temperature and atmospheric precipitations in coordinates grid nodes and calculate current water/heat balances with the preset discontinuity interval.

Calculations by the HCC method result in fields of the following characteristics over the calculated time interval (month) [7]: thermal power resources of evaporation; maximal possible evaporation; thermal power consumption for snow and seasonal frozen earth melting; total moistening; moisture reserves if the soil active layer at the beginning and t the end of the calculated time period; evaporation; and flow layer.

The climatic flow is to be determined by the formula:

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

where Z is evaporation from the land surface, mm;

Z_M is the water equivalent of the evaporation thermal power resources, mm;

n is a landscape conditions parameter reflecting the flow formation geo/morphological conditions and the active layer ability to leave excessive moisture under the action of gravitation forces;

H is the total moistening, mm.

All calculations have been performed with a raster calculator SAGA GIS [8]. Initial data (precipitation and temperature) have been taken from WorldClim reanalysis [4]. To calculate the landscape conditions parameter n [9] we have used potential humidity index (*Wetness Index* – W_T), obtained automatically on the basis of SRTM with spatial resolution 30 m (1 arc-sec) in SAGA GIS [8].

Formula [9] was used for transfer from TWI to parameter n :

$$n = 1,1 + \frac{TWI}{6,1}. \quad (2)$$

Parameter n is an informative integral hydrographic characteristic of river catchments, which enables landscape/ecological modelling [10].

To take into account negative temperatures and snow cover height we used the WorldClim reanalysis data. We determined the snow cover height (m) by formula:

$$h_c = \mu \cdot (KX_{3MM} - Z_{3MM}), \quad (4)$$

where KX_{3MM} is the total precipitation over the winter period, mm; Z_{3MM} is the total evaporation over the winter period, mm; μ is a parameter to be determined depending on the landscape type (0.05 on average).

We calculated the total precipitation (H) for individual months with taking into account the water content changes in the active layer. Changes of relative (in parts of the least probability, $V=W/HB$) humidity of the active layer ($V_{1,2}$) were determined according to the following formulas [6]:

$$V_2 = ((r + 1) \cdot V_{cp} - V_1)/r, \quad (5)$$

$$V_{cp} = [(KX/HB + V_1)/(Z_M/HB + V_1^{1-r})]^{1/r}, \quad (6)$$

where HB is the least water-absorbing capacity of the active layer;

V_1 is relative humidity as current in the beginning of the calculated period;

V_2 is relative humidity as current by the end of the calculated period;

V_{cp} is average monthly value of relative humidity;

r is the parameter characterizing the soils ability to convey moisture to the evaporating surface and to spend it to evaporation, that depends on the active layer mechanical structure and salinity.

Organogenetic horizons that level differences in the r parameter values caused by mechanical structure appear in the process of peat accumulation and growth of forest floor. That is why calculation of the r parameter based on the digital soil reanalysis TAXNWRB with resolution of 250 m [11] does not result in correct outputs. In this connection, one can take an average value of the r parameter as equal to 1.9.

We calculated the active layer (HB) least moisture capacity against dependency reflecting association of water/physical processes in the active layer [12]:

$$HB = \left(\frac{r - 0,15}{0,004} \right) \cdot \exp \left(- \frac{0,693}{n} \right). \quad (7)$$

We calculated the evaporation thermal/power resources (Z_M) taking into account the illumination coefficient (V_s – Visible sky) in % determined in “Sky View Factor” module:

$$Z_M = E_{vp} \cdot \exp \left(\frac{V_s}{100} \right), \quad (8)$$

where E_{vp} is the surface evaporation and evaporation values calculated by minimal, average and maximal temperatures according to the WorldClim reanalysis data in the «Tool ETpot (after Hargreaves, Grid)» in Saga GIS.

We corrected climatic thermal/power resources of April and May for snow and seasonal frost melting [6]:

$$\Delta Z_M = \frac{0,167 \cdot \Sigma(t < 0C^\circ)}{h_c + 0,2}, \quad (3)$$

where $\Sigma(t < 0C^\circ)$ is the sum of negative temperatures over the winter period; h_c is the height of snow cover by the start of snow melting, m.

When calculating the total moistening over the snow melt period (April and May) we added precipitations accumulated over the winter period (November-March) minus winter evaporation to the current corrected precipitations (KX) We determined the part of correction associated with snow and season freeze melt for April proportionally to possible layer of snow melting in April (the residue was moved to May).

RESULTS AND DISCUSSION

The deforestation impact on water balance

Nowadays, unfortunately, satellite images of Siberia show the vast areas of complete deforestation. The question appears: how this anthropogenic impact changes the water balance structure.

The common opinion is that complete logged lands cardinaly change intensity of their biological, hydro/physical, and hydrological processes, therefore, such logged lands are to be considered as the main factors determining formation of quantitative characteristics of flow and chemical composition of water draining from the catchment [13]. The above method of the water balance calculation was used in this work to estimate the flow changes after complete deforestation.

When comparatively analyzing the consequences of complete deforestation on the Chet River catchment within the boundaries of Teguldet rayon (Fig. 2) we revealed the annual runoff 3-5 mm increase. It should be mentioned that at that moment the proportion of fresh, not covered by underwood, logged lands does not exceed 7% on this territory. An average area of the logged land is 50 hectares. With the current logging rate one can expect two times increase of the logged land area as early as in some 5-10 years, and, consequently, one expect the runoff increase up to 10 mm (5%) due to decrease of evaporation from the logged land. Directly on the logged land total evaporation on the average decreases by 25-30% (30-40 mm), while climatic runoff increases up to 50–60 % (25–70 mm).

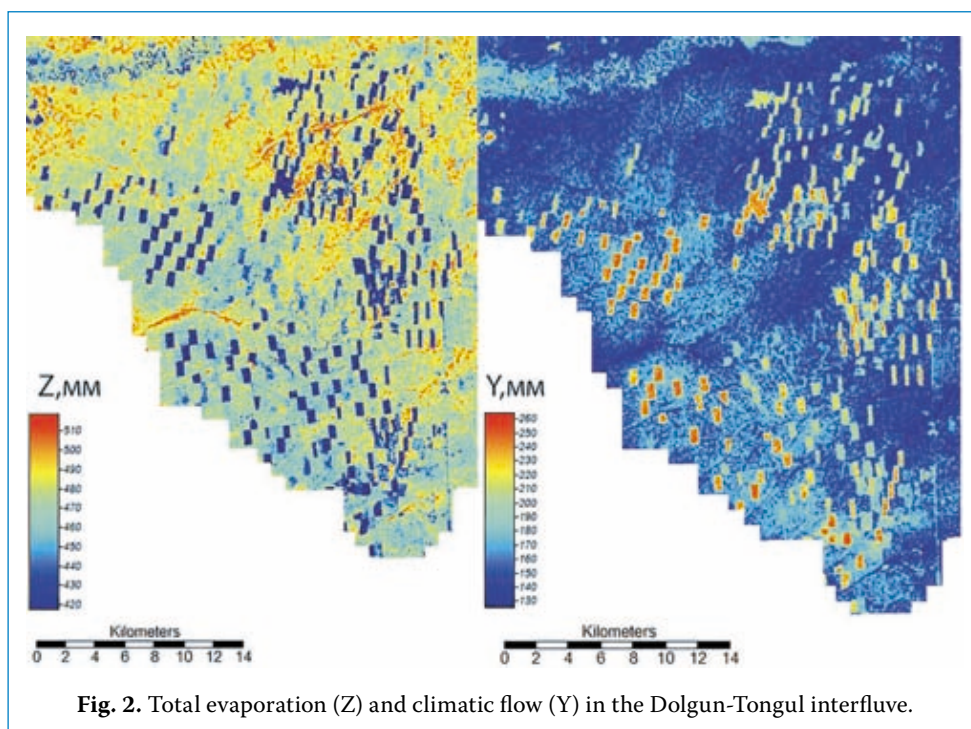


Fig. 2. Total evaporation (Z) and climatic flow (Y) in the Dolgun-Tongul interfluve.

Estimation of the swamping potential

The territory inclination to swamping is caused by the water stagnation in the absence of conditions for discharge of excessive water and lack of thermal/power resources for its evaporation. The proportion of lands inclined to swamping reflects an integral degree of the soil cover hydromorphic characteristics, as well as the proportion of lands where the process of swamping can develop provided there is a lack of thermal/power resources for the excessive moisture evaporation.

Outcomes of the carried out estimation of the swamping potential for catchments in different natural/climatic conditions are given in Table. We determined the swamping potential as the difference of the proportion of catchments with the landscape runoff conditions parameter n values from 3 to 3,5. The n parameter values $> 3,0$ % include all potentially hydromorphic lands. The n parameter values $> 3,3$ % includes swamps and wetlands, while $n > 3,5$ mean swamps.

For the Western-Siberian Plain the threat of swamping is a widespread geo/ecological risk that is the most evident in the process of road-building. The optimal swamping of river basins, from the point of view of decreasing of maximal flood water levels in rivers, should be in the range of 20–70 %. To maintain the permissible degree of swamping it is necessary to clean hydrographic network [14]. For adjusting mountain (the Kucherla River) and sub/mountain (the Basandayka and Latat rivers) territories of the Western Siberia the risk of swamping is not relevant.

Table. Estimation of the river basins swamping potential

Basin	Landscape conditions of runoff parameter, n	Catchment average height, m	Slope, ‰	Hydromorphic lands, %	Swamps and wetlands, %	Swamps, %	Swamping potential, %
the Latat River – village of Yagodnoye	3.11	170	3.44	10,8	3	2.5	8.3
the Berla River – village of Berlinka	2.76	150	3.86	23.7	8.1	5	18.7
the Bolshoy Tatosh River – village of Bolshoy Tatosh.	3.00	110	0.83	30	11.1	5	25
the Bakchar River – village of Polynyanka	3.09	140	0.65	58.6	33.4	14	44.6
the Basandayka River – village of Basandayka	2.57	175	3.44	8	3.2	1.4	6.6
the Poros River – village of Zorkaltsevo	2.98	135	2.65	25	9.86	5	20
the Andarma River – village of Panychevo	2.83	130	0.37	39.7	20	7	32.7
the Iksa River – village of Plotnikovo	2.97	120	0.36	53	31	10.8	42.2
the Kucherla River – village of Kucherla	2.20	2260	46.6	2.4	1.4	0.8	1.6

CONCLUSIONS

We continuously upgrade the methodical approach to the water balance landscape/ecological modelling presented within the framework of this article taking into account relevant achievements of modern information techniques, such as relief digital model, land remote sensing data and reanalysis data.

We have carried out quantitative estimation of the complete logging impact on water balance, for the time present only for the Tomsk Oblast Teguldet Rayon. For the Chet River the portion of logged lands can twice increase even after 5-10 years and the mean annual runoff can increase because of logging up to 10 mm (5%) due to decrease of evaporation from the logged lands. Directly on the logged lands total evaporation on the average decreases by 25–30 % (30–40 mm), while climatic runoff increases up to 50–60 % (25–70 mm). Such alteration of the water balance on the land plots where the value of landscape conditions parameter in more than 3 facilitates the swamping processes.

Estimation of the swamping potential based on the distribution of a parameter which reflects the runoff conditions demonstrate that for the Western-Siberian Plain the threat of swamping is a significant geo/ecological risk. For any good-draining territories of the West Siberia this risk is not so relevant.

For the future, we suppose optimization of the land use structure based on the presented outputs and the basin approach for maintaining sustainable development of the territory.

REFERENCES

1. *Erofeyev A.A.* Opredelenie struktury basseynovyh geosistem na osnove geoinformacionnogo modelirovaniya (na primere basseynov malyh rek Tomskaya i ego okrestnostey) [Landscape and ecological analysis of small rivers watersheds on the basis of GIS-based modelling] // *Vestn. Tom. gos. un-ta.* 2012. № 363. Pp. 192–195.

2. *Karnatsevich I.V.* Kompyuternaya sistema massovyih raschetov tekuschih vodnyih balansov rechnyih vodosborov neizuchennyih oblastey sushy: monografiya [Computer system of mass calculations of current water balance of river basins of unexplored land areas: monograph] / I.V. Karnatsevich, S.A. Hrushev. Omsk: Izd-vo OmGPU, 2014. 175 p.
3. EarthExplorer. Access regime: URL: earthexplorer.usgs.gov (date 25.01.20).
4. *Fick S.E., Hijmans R.J.* WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology 2017. Vol. 37. Pp. 4302–4315.
5. *Volchek A.A.* Kompyuternoe modelirovanie vodnogo balansa malyh rek Belarusi [Computer modeling of the water balance of small rivers in Belarus] // Vestn. Polockogo gos. un-ta. 2007. № 6. Pp. 152–155.
6. *Mezencev V.S., Karnatsevich I.V.* Uvlazhnennost Zapadno-Sibirskoy ravniny [Wetness of West Siberian Plain]. L.: Gidrometeoizdat, 1973. 168 p.
7. *Karnatsevich I.V., Mezentseva O.V., Tusupbekov G.A., Bikbula-tova G.G.* Vozobnovlyayemye resursy teplotlagooobespechennosti Zapadno-Sibirskoy ravniny i dinamika ikh kharakteristik [Study of dynamics and mapping of elements of energy and water balance and characteristics of energy and water availability]. Omsk, Omsk State Agricultural University Press, 2007. 268 p.
8. SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) / The official SAGA website. Access regime: URL: <http://www.sagagis.org/en/index.html> (date 15.11.19).
9. *Erofeev A.A., Kopysov S.G., Nikiforov A.N.* Landshaftno-geofizicheskiy podhod k zonirovaniyu struktury zemlepolzovaniya na malom vodosbore [Landscape physical approach to zoning land use structure at a small watershed] // Izv. Tom. politekhn. un-ta. Inzhiring georesursov. 2018. T. 329, № 6. Pp. 39–47.
10. *Kopysov S.G.* Parametricheskii uchet landshaftnyh usloviy 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. № 3. Pp. 157–161.
11. SoilGrids: global gridded soil information / Access regime: URL: <https://soilgrids.org> (date: 20.01.20).
12. *Kopysov S.G.* Raschet elementov vodnogo balansa gidromorfnyh landshaftov po vodno-fizicheskim svoystvam pochvennogo pokrova [Evaluating water balance elements for hydromorphic landscapes by hydro/physical properties of soil cover] // Vodnye resursy. 2015. T 42. № 1. Pp. 26–30.
13. *Karpechko Yu.V.* Vliyaniye rubok na stok s lesopokrytoy chasti vodosbora Onezhskogo ozera [Logging effects on runoff from the forested part of the catchment of the Lake Onega] // Trudy Karelskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk. Seriya: Limnologiya. – Petrozavodsk, 2016. № 5. Pp. 13–20.
14. *Kopysov S.G.* Vosstanovlenie gidrograficheskoy seti vodosborov – osnovnoj sposob borby s zabolachivaniem vodorazdelov [Restoration of the catchment hydrographic network as the main method of watershed swamping control] // Water Sector of Russia. 2010. № 5. Pp. 96–103.

For citation: *Eliseyev A.O., Kopysov S.G. Landscape/ecological Modelling of Water Balance of the Western Siberia Southeast // Water Sector of Russia. 2020. No. 2. P. 102–117.*

About the author:

Artem O. Eliseyev, Engineer, Tomsk State National Research University, ul. Lenina, 36, Tomsk, 634050, Russia; post-graduate student, Institute for monitoring climate and environmental systems, SB RAS, Akademicheskii prospekt, 10/3, Tomsk, 634055, Russia; e-mail: EAO_sibgidro@bk.ru

Sergey G. Kopysov, Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS; Akademicheskii prospekt, 10/3, Tomsk, 634055, Russia; Associate Professor, Tomsk State National Research University, ul. Lenina, 36, Tomsk, 634050, Russia; e-mail: wosypok@mail.ru