

УДК 332.362

## ЛАНДШАФТНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ЗОНИРОВАНИЮ СТРУКТУРЫ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА МАЛОМ ВОДОСБОРЕ

**Ерофеев Александр Анатольевич**<sup>1,2</sup>,  
erofeew@yandex.ru

**Копысов Сергей Геннадьевич**<sup>1,3</sup>,  
wosypok@mail.ru

**Никифоров Артём Николаевич**<sup>3</sup>,  
a.nik-n@mail.ru

<sup>1</sup> Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

<sup>2</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

<sup>3</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3.

Актуальность работы обусловлена необходимостью оптимизации существующего землепользования на малых водосборах для обеспечения устойчивого эколого-социального развития.

**Цель работы:** создание на уровне малого водосбора метода устойчивой и оптимальной организации ландшафта с учетом распределенных микроклиматических и ландшафтно-гидрологических условий для наиболее эффективного использования земельных ресурсов в соответствии с динамикой природных процессов на водосборе.

**Методы:** синтез методов геофизических исследований, в частности метода гидролого-климатических расчетов в сочетании с методами количественного описания рельефа земной поверхности на основе цифровых моделей рельефа (геоморфометрии). Выполнен расчет ряда гидроциркуляционных и инсоляционных морфометрических показателей рельефа, оказывающих влияние на разнообразие ландшафтных условий формирования водного стока. Учет различий в условиях произрастания на разных формах рельефа осуществляется на основе интеграции метода гидролого-климатических расчетов со ступенями увлажнения по геоботанической шкале Л.Г. Раменского, характеризующими условия местообитания по составу растительности. Для уточнения модельных расчетов в характерных участках исследуемого водосбора организован автоматизированный мониторинг стока воды и некоторых других воднобалансовых элементов.

**Результаты.** На основе выявленного разнообразия ландшафтных ресурсов смоделировано оптимальное распределение видов землепользования по исследуемому водосбору, определена экологическая ёмкость водосбора по потенциальному водопотреблению. Применение предлагаемого метода позволяет обеспечить энергоэффективное использование ландшафтных ресурсов, а значит и устойчивое развитие природно-социальных систем. В первую очередь метод следует рекомендовать для вновь вводимых в сельскохозяйственный оборот земель и буферных зон природоохранных территорий.

### Ключевые слова:

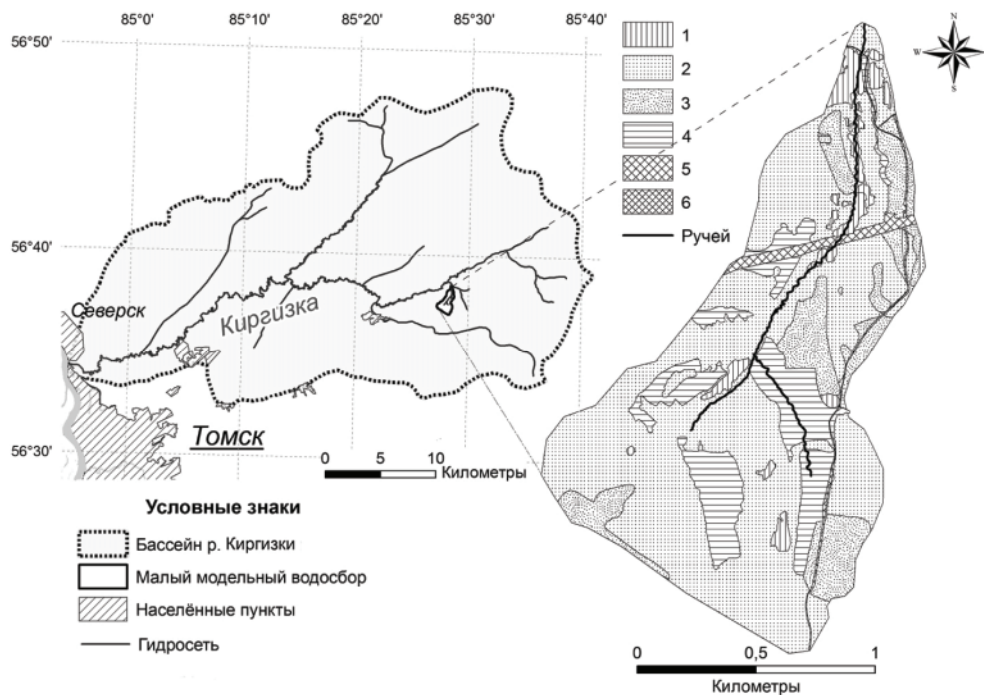
Землепользование, геофизика ландшафта, водный баланс, метод гидролого-климатических расчетов, геоморфометрия, Западная Сибирь.

### Введение

Подход к анализу разнородных параметров окружающей среды, полученных дистанционными способами, при создании композитной карты организации оптимального землепользования территории, в последнее время получает всё более широкое распространение, как, например, в работах [1, 2]. При этом комплексно подойти к решению задачи организации устойчивого землепользования может позволить интегральный ландшафтно-геофизический подход, применяемый на малых водосборах, рассматриваемых в качестве хозяйственной единицы. Такая постановка проблемы была обозначена еще в конце XIX в. В.В. Докучаевым [3], занимавшимся природообустройством и предпринимавшим меры по оптимизации природных систем с учётом экологической роли различных элементов ландшафта. В Водном кодексе РФ

[4] также предусматривается разработка схем комплексного использования и охраны водных объектов, в частности, в целях определения допустимой антропогенной нагрузки на водные объекты и обеспечения их охраны. Теоретической основой для достижения указанных целей могут являться воднобалансовые исследования для отдельных речных бассейнов. При этом в данное время появляется возможность взглянуть на решение подобных задач с использованием новейших высокопроизводительных методов геомоделирования.

К началу XXI в. было доказано, что отдельные типы ландшафтов играют гораздо большую роль в глобальном притоке явного или скрытого тепла от суши в атмосферу, чем можно было ожидать [5]. Исходя из этого, предлагаемый в данной статье метод решения задачи организации оптимальной структуры землепользования основан на расчёте



**Рис. 1.** Географическое расположение модельного водосбора и существующая структура видов землепользования: 1) елово-пихтовый высокотравный лес (4,5 %); 2) берёзово-осиновые высокотравные леса (62 %); 3) брошенные сельскохозяйственные угодья с густым берёзовым молодняком (14,5 %); 4) сенокосы с высокотравными лугами (15,5 %); 5) грунто-вые зарастающие дороги (1,8 %); 6) просеки ЛЭП с разнотравными лугами (1,7 %)

**Fig. 1.** Spatial location of the studied watershed and the existing structure of land use types: 1) fir high grass forests (4,5 %); 2) birch and aspen high grass forests; 3) abandoned agricultural lands with dense young birch forests (14,5 %); 4) hay-making with high grass meadows (15,5 %); 5) soil regenerating roads (1,8 %); 6) rights-of-way of power transmission line with grass meadows (1,7 %)

элементов водного баланса с отдельных ландшафтов в пределах речных бассейнов по методу гидролого-климатических расчетов (ГКР) с учётом ландшафтных условий формирования стока, определяемых по гидроциркуляционным и инсоляционным геофизическим показателям, рассчитываемым в ГИС на основе цифровых моделей рельефа.

#### Модельный водосбор

Объект исследования – модельный водосбор площадью 2,04 км<sup>2</sup> – располагается в 30 км от города Томска, в бассейне реки Киргизка (844 км<sup>2</sup>) на ручье, который является притоком второго порядка (рис. 1).

На водосборе организован учёт стока воды в среднем течении и в замыкающем створе с помощью треугольного водослива с подтопленным нижним бьефом. Также в средней и нижней части водосбора установлены экспериментальные системы автоматического мониторинга элементов водного баланса (САМ ЭВБ) [6].

Выбор модельного водосбора был обусловлен следующими факторами:

- выраженным рельефом, позволяющим однозначно определить границы водосбора и обеспечивающим разнообразие ландшафтных;
- относительной близостью к городу, предоставляющей возможность регулярных натуральных

наблюдений, в сочетании со слабой антропогенной нагрузкой на водосбор.

Относительный перепад высот поверхности модельного водосбора, расположенного на пологоволнистой приподнятой дренированной равнине, составляет 58 м (абсолютная высота в устьевой части 149 м). В пределах водосбора выделяются две крупные ложбины шириной 170–250 м, в которых преимущественно и концентрируется сток. Среди основных типов рельефа на исследуемой территории выделяются: 1) пониженный (пойменный), расположенный на абсолютных высотах 150–180 м с уклонами 0,5–3° и занимающий дно ложбин; 2) склоновый, расположенный на крутых склонах (5–13°) с абсолютными высотами 165–195 м; 3) выровненный (слабонаклонный), расположенный на водораздельных пространствах с абсолютными высотами 170–207 м и незначительными уклонами 0,3–2°.

Для изучения почвенного покрова в 2015 г. нами заложено разрез в нижней части водосбора на краю разнотравного луга, граничащего с берёзовым лесом с примесью ели. Напочвенный покров представлен осочкой малой, зверобоем лекарственным, чиной Гмелина, володушкой золотистой, лютиком, манжеткой. Проективное покрытие составляет 50–60 %. По современной почвенной классификации таксономические характеристики

почв следующие: *отдел* – текстурно-дифференцированная; *тип* – дерново-подзолистая; *подтип* – контактно-осветленная; *род* – безкарбонатная; *вид* – сверхглубокоосветленная; *разновидность* – среднесуглинистая; *разряд* – с мощным профилем.

Леса на данной территории преимущественно вторичные берёзово-осиновые, в понижениях с примесью ели и пихты (рис. 1).

#### Методика геоинформационного моделирования

Как известно, важное геофизическое значение рельефа земной поверхности связано с перераспределением им вещества и энергии, а следовательно, и полей гравитации и инсоляции. При его геоинформационном моделировании нами был апробирован комбинированный способ создания цифровой модели рельефа (ЦМР). В качестве базовой информации о рельефе использовались данные SRTM с пространственным разрешением 30 м и Aster GDEM с пространственным разрешением 15 м [7–9]. Вся поверхность модельного водосбора состояла из 42080 пикселей (разрешение 160 на 263 пикселей). Для уточнения матрицы рельефа в неё включалась информация, полученная с крупномасштабных топокарт масштаба 1:25000 (горизонталы, высотные отметки и урезы воды), а также материалы нивелирной съёмки долинно-русловой сети. Это позволило увеличить пространственное разрешение ЦМР до 10 м, а точность определения абсолютных высот – в среднем до 1–2 м. Такой подход дал возможность анализировать рельеф водосбора в достаточной для интегральных водно-балансовых исследований степени.

Полученная матрица высот подвергалась гидрологической коррекции [10, 11]. После чего, с целью дальнейшего их преобразования в элементы водного баланса территории, рассчитывались ключевые *гидроциркуляционные* (индекс потенциальной влажности) и *инсоляционные* (экспозиция, закрытость горизонта) морфометрические величины (МВ).

#### Учёт гидроциркуляционных параметров при расчёте элементов водного баланса

Наиболее согласованной с точностью задания внешних условий является интегральная форма записи уравнений теплового и водного баланса. Поэтому нами для расчётов гидролого-климатического режима используется система уравнений метода ГКР [12–15], представляющая собой математическую модель процессов преобразования влаги на уровне деятельной поверхности водосборов, основанную на законах сохранения энергии и материи [13].

В методе ГКР ландшафтные условия формирования стока учитываются параметром  $n$ , отражающим в первую очередь геоморфологические условия формирования стока и способность деятельного слоя ландшафта сбрасывать избыточную влагу под действием сил гравитации [9, 10].

По своему физическому смыслу наиболее близким к параметру ландшафтных условий  $n$  в методе ГКР является составная гидроциркуляционная МВ «индекс потенциальной влажности» (Wetness Index –  $W_T$ ) [16–19], выделяемая автоматически на основе ЦМР при помощи специализированного программного обеспечения (SAGA, GRASS, ILWIS и др.). Его ландшафтная интерпретация в бассейнах малых рек Нижнетомской природной провинции дана в работе А.А. Ерофеева [20]. Позднее эти две величины были нами связаны следующей зависимостью [21]:

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

Показатель максимально возможного испарения в методе ГКР не связан с конкретным видом испаряющей поверхности и представляет собой усреднённые для больших территорий величины [12]. Эта проблема была нами частично решена путём учёта инсоляционных характеристик ландшафта, рассчитываемых в ГИС-пакете SAGA [11]. Было сделано допущение: для территорий с выраженным рельефом пространственное распределение теплоэнергетических ресурсов испарения должно определяться отношением фактической продолжительности освещённости конкретного участка,  $j_i$ , к продолжительности освещённости при нулевом уклоне и открытом горизонте,  $j_0$ . На основании этого к сумме температур выше 10 градусов ( $\sum t_{>10^\circ\text{C}}$ ) вводится следующая поправка, учитывающая уклоны, экспозиции и закрытость горизонта:

$$\chi = 1 + \log\left(\frac{j_i}{j_0}\right). \quad (2)$$

Введение данной поправки даёт результаты аналогичные табличным данным [14] о термических характеристиках различных форм рельефа. Формула для расчёта водного эквивалента теплоэнергетических ресурсов испарения (испаряемости) [12] с учётом данной поправки приобретает следующий вид:

$$Z_M = 200\left(\frac{\chi \sum t_{>10^\circ\text{C}}}{1000}\right) + 306 = \frac{\chi \sum t_{>10^\circ\text{C}}}{5} + 306. \quad (3)$$

Результаты расчёта гидроциркуляционных параметров представлены на рис. 2. Для выравненных элементов рельефа принята испаряемость 678 мм, вычисленная по ГМС Томск за период с 1881 по 2013 гг. по данным [22].

Расчитанное пространственное распределение испарения (рис. 2-Г) показывает картину, схожую с распределением параметра ландшафтных условий формирования стока (рис. 2-А), что для территорий с оптимальным увлажнением (осадки  $\approx$  испаряемость) объясняется недостатком влаги на наиболее дренированных элементах рельефа (испарение 461 мм). Средняя многолетняя величина испарения на водосборе составляет 496 мм, а на наиболее увлажнённых участках – до 522 мм.

Величина местного стока (рис. 2-Б) имеет наименьшие значения там, где из-за плохих условий сброса избыточной влаги (максимальные значения параметра  $n$ ) испаряется (рис. 2-В) наибольшее количество воды. Реальный русловой сток интегрирует местный сток в виде русловой сети. Изменчивость величины осадков от рельефа и растительности нами не учитывалась ввиду отсутствия однозначных схем учёта и недостаточной точности измерения осадков. В дальнейшем этот вопрос будет решаться с привлечением данных снегомерных съёмок.

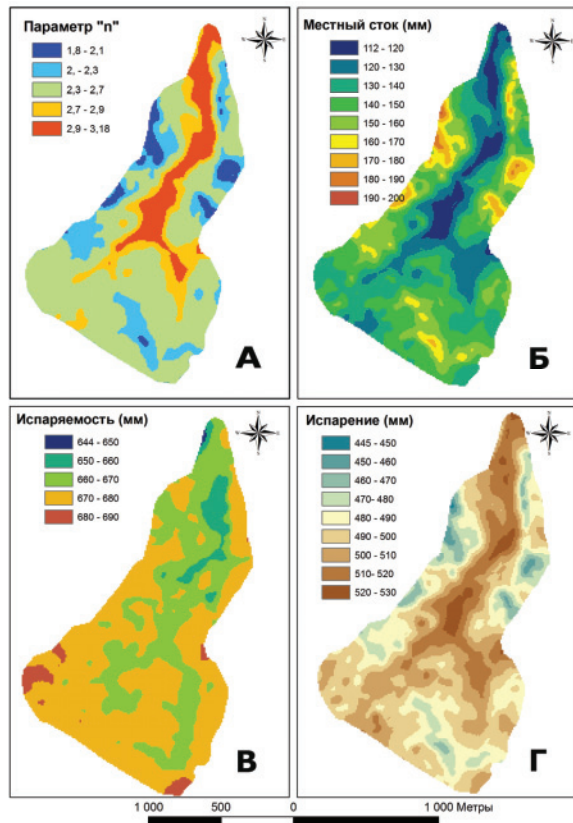


Рис. 2. Распределение параметра ландшафтных условий формирования стока  $n$  и основных среднесезонных величин водного баланса на модельном водосборе

Fig. 2. Distribution of the parameter of runoff generation landscape conditions  $n$  and normal annual amounts of water balance at the studied watershed

#### Гидролого-климатическая оптимизация структуры землепользования

В соответствии с агроклиматическим районированием на исследуемом водосборе следует развивать животноводческое и нетоварное полевое хозяйство. Рекомендуется выращивать среднеспелые и раннеспелые сорта яровой пшеницы, озимой ржи, ранне- и позднеспелые сорта ячменя, овса, гречихи, картофеля, гороха, льна [23].

Во времена подъёма целины все пригодные земли на водосборе были освоены под пашню, в том числе и расположенные на покатых и пологих

склонах подверженных эрозии. Это было обусловлено борьбой с мелкоконтурностью, которая привела к разрушению установившихся биогеоценозов и к снижению плодородия почв.

После 1992 г. пашню на водосборе перестали обрабатывать, что привело к её резкому зарастанию густым ковром березовой поросли (рис. 1). Значительно медленнее и неравномерно зарастали земли, использовавшие под сенокосы. За прошедшие 25 лет почвы на исследуемом водосборе уже хорошо отдохнули, и теперь на основании экологических принципов их вновь можно запускать в правильное землепользование, которое, по мнению Ю. Одума [24], является самым важным практическим приложением науки об окружающей среде. Введение брошенных земель в оборот потребует немало финансовых затрат на раскорчевку, а этого можно было бы избежать, если бы вышедшую из оборота пашню в течение первых лет обкашивали.

При распределении землепользования по площади водосбора, по нашему мнению, следует отталкиваться от фундаментальных основ устойчивости. Считается, что бинарные системы (всё-ничего, порядок-хаос) устойчивы только внутри диапазона от  $1/3$  до  $2/3$ . Иначе резко возрастает их неустойчивость, теряется управление и без принудительного вмешательства система обречена на распад. Именно поэтому Ю. Одум [24] писал, что человек не должен стремиться получать более одной трети валовой продукции, если он не готов поставлять энергию для обеспечения долговременного поддержания первичной продукции в биосфере.

Поэтому распределение землепользования по водосбору должно учитывать обеспеченность параметра ландшафтных условий  $n$  так, чтобы в естественном состоянии оставалось не менее  $1/3$ , а интенсивно использовалось (пашня, дороги, застройка) не более  $1/3$  площади водосбора. Остальная территория водосбора должна использоваться умеренно (сенокосы, пастбища, сады и лесопосадки).

Для выполнения этих условия на исследуемом водосборе под сельскохозяйственные нужды, с учётом севооборотов и разделительных лесополос, следует использовать земли с значениями параметра  $n$  от 2,25 до 2,75. В соответствии с полученным распределением параметра ландшафтных условий по водосбору именно такому диапазону изменения параметра  $n$  соответствует  $2/3$  площади водосбора. На этой площади водосбора должен быть организован севооборот таким образом, чтобы одновременно на пашню приходилось не более  $2/9$  общей площади водосбора. Это обусловлено тем, что для разрушающего ведения земледельческого хозяйства наиболее оптимальным соотношением пашни к сенокосным угодьям является один к трем, что позволяет сохранять естественное плодородие земель за счет естественных геохимических циклов и внесения навоза.

Предлагаемый вариант структуры землепользования основывается на необходимости возвра-

щения к мелкоконтурному земледелию, т. е. расчленению больших полей на однородные участки в соответствии с их экологическими и технологическими особенностями. Обычно это предполагает проведение границ участков (лесополос) по контуру горизонталей местности [25]. Как показывает исследование, более комплексно экологические условия отражает параметр ландшафтных условий стока  $n$ , так как он интегрально отражает уклон и длину склона. При этом под пашню допустимо использовать земли на возвышенностях со значениями параметра  $n$  от 2,2 до 2,8. При больших (опасность заболачивания) и меньших (опасность эрозии) значениях параметра  $n$  допускается использование земель только в качестве сенокосов и пастбищ, а при значениях  $n$  более 2,9 (водоохранная зона поверхностного стока) и менее 2,2 (водоохранная зона подземного стока) необходимо проводить залесение.

Предлагаемая организация землепользования должна способствовать поглощению поверхностного стока, снижению интенсивности смыва почв, регулированию ветрового режима и снегонакоплению, снижению интенсивности снеготаяния (уменьшение эрозии и снижение максимальных уровней на реках) и, как принято считать [25], повышает урожайность сельскохозяйственных культур и общую биологическую продуктивность ландшафта на 10–15 %.

В конце XIX в. [26] на исследуемом водосборе действовала следующая система севооборотов: с целины (не бывшей в обработке земли) снимались 4–5 хлебов подряд, затем земля служила сенокосом 2 года (в засушливые годы на высоких местах травы очень мало), после чего обращалась в залежь на 10–15 лет. При такой системе земледелия озимые посевы на мощных слоях серой земли давали урожай САМ 10–16, а на возвышенных местах в засушливые годы не более чем САМ 3.

Такая зависимость от текущего увлажнения говорит о необходимости регулирования водного и теплового режима почв для чего разумно в овражно-балочной сети восстановить и создать новые пруды, а также вести снегозадержание на высоких элементах рельефа за счёт лесополос.

Существенные различия урожайности на разных формах рельефа объясняются количественной характеристикой растительного компонента экосистем – ступенями увлажнения (СУ) по шкале Л.Г. Раменского [27], характеризующими условия местообитания по составу растительности. Примерами других подходов служит моделирование динамики индекса листового покрытия (Leaf Area Index – LAI), как, например, в работах [28, 29]. Однако LAI подходит больше для глобального моделирования древесной растительности, так как не отражает местные условия произрастания напочвенного покрова.

Для моделирования динамики природных процессов на водосборах, индикатором которых является напочвенный растительный покров, осуществ-

ляется расчёт ступеней увлажнения по цифровым моделям рельефа и климатической увлажнённости ( $\beta_H = H/Z_M$ ) по формуле, предложенной С.Г. Копысовым [30]:

$$СУ = 100\beta_H \left( \frac{r-1}{rn+1} \right)^{1/m}, \quad (4)$$

где водно-физические свойства почвы учитываются параметром  $r$  [12, 13].

На исследуемом водосборе выявлены ступени увлажнения от 62 до 73. Наложение карт ступеней увлажнения и зоны хозяйственной деятельности (при значениях параметра  $n$  от 2,25 до 2,75) позволило построить карту рекомендуемой структуры землепользования (рис. 3).

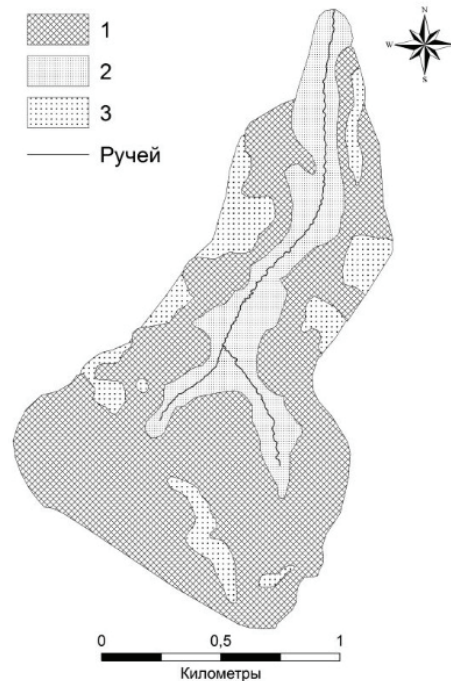


Рис. 3. Рекомендуемая структура землепользования с учётом параметра  $n$  и ступеней увлажнения

Fig. 3. Recommended structure of land use in accordance with  $n$  parameter and moisture ranges

При осуществлении предлагаемого зонирования земли, используемые для ведения сельскохозяйственной деятельности в соответствии с пунктом 3 статьи 42 Федерального закона «Об охране окружающей среды» [31], получили необходимые санитарно-защитные зоны, исключающие загрязнение поверхностных и подземных вод.

На итоговой карте (рис. 3) были выделены: 1) зона хозяйственной деятельности, соответствующая зоне оптимального возделывания полевых культур, страдающих от недостатка влаги в сухие годы во второй половине лета (участки со ступенями увлажнения 64–68, т. е. преимущественно влажнолугового увлажнения с почвами без признаков оглеения на достаточно дренированных территориях [27]); 2) водоохранная зона поверхностного стока, соответствующая пойменным

ландшафтам, находящимся в вещественно-энергетической взаимосвязи с русловыми стоками. На ней, согласно статье 65 Водного кодекса РФ [4], должен устанавливаться специальный режим хозяйственной деятельности; 3) водоохранная зона питания грунтовых вод, расположенная в местах локальных понижений рельефа, сток с которых, ожидаемо, будет проникать в глубь почвенно-грунтового слоя.

Что касается экологической ёмкости исследуемого водосбора, следует отметить, что на исследуемой территории чиновники по крестьянским делам закладывали примерно по 14 га удобной земли на крестьянскую душу [26], что должно было позволить крестьянам вести мелкотоварное производство. Сегодня под «удобной» землёй следует понимать не более 2/3 площади водосбора, а значит, по нормам столетней давности, экологическая ём-

кость исследуемого водосбора площадью 204 га не превышает 10 человек.

### Заключение

На основе выявленного разнообразия ландшафтных ресурсов было смоделировано оптимальное распределение видов землепользования по водосбору. Применение предлагаемого метода позволяет обеспечить энергоэффективное использование ландшафтных ресурсов, а значит и устойчивое развитие природно-социальных систем, связанных с ним. В первую очередь метод следует рекомендовать для вновь вводимых в сельскохозяйственный оборот земель и буферных зон природоохраненных территорий.

*Работа выполнена при финансовой поддержке программы повышения конкурентоспособности ТГУ проект № 8.1.32.2018, а также грантов РФФИ «Мол\_а» № 14-05-31121, 14-05-00700.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ramamohana Rao P., Suneetha P. Land use modeling for sustainable rural development // International Journal of Science, Environment and Technology. – 2012. – V. 1. – № 5. – P. 519–532.
2. Мышляков С.Г., Глотов А.А. «Геоаналитика. Агро» – инновационное решение для сельскохозяйственного мониторинга. Геоаналитика. – М.: ООО «Компания Совзонд», 2015. – С. 58–62.
3. Докучаев В.В. Наши степи прежде и теперь // Избр. труды. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – С. 317–438.
4. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 N 74-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации, 1995, N 47, ст. 4471.
5. Роль ландшафтной структуры поверхности суши в климатической системе / А.Б. Шмакин, А.Н. Кренке, Ю.А. Михайлов, Д.В. Турков // Известия АН СССР. Серия географическая. – 2001. – № 4. – С. 38–43.
6. Копысов С.Г., Ярлыков Р.В. Опыт организации гидролого-климатических наблюдений на малых модельных водосборах Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 12. – С. 115–121.
7. U.S. Geological Survey (USGS). URL: <http://usgs.gov> (дата обращения 22.08.2017).
8. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639 / E. Rodriguez, C.S. Morris, J.E. Belz, E.C. Chapin, J.M. Martin, W. Daffer, S. Hensley. – Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 2005. – 143 p.
9. ASTER GDEM, 2009. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (дата обращения 23.05.2017).
10. Burrough P., McDonnell R., Lloyd Ch. Principles of Geographical Information Systems. Oxford: OUP, 2015. – 432 p.
11. 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+. 2017. URL: [https://sagatutorials.files.wordpress.com/2016/02/saga\\_manual\\_english\\_cdu\\_june-2017.pdf](https://sagatutorials.files.wordpress.com/2016/02/saga_manual_english_cdu_june-2017.pdf) (дата обращения 23.05.2017).
12. Мезенцев В.С. Гидрологические расчеты в мелиоративных целях. – Омск: Изд-во Омского СХИ, 1982. – 80 с.
13. Возобновляемые ресурсы тепловлагодобеспеченности Западно-Сибирской равнины и динамика их характеристик / И.В. Карнаевич, О.В. Мезенцева, Ж.А. Тусупбеков, Г.Г. Бикбулатова. – Омск: Изд-во Омского государственного аграрного университета, 2007. – 268 с.
14. Копысов С.Г. Параметрический учёт ландшафтных условий стока в методе гидролого-климатических расчётов // География и природные ресурсы. – 2014. – № 3. – С. 157–161.
15. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield / G. Zhou, X. Wei, X. Chen, P. Zhou, X. Liu, Yi. Xiao, G. Sun, D.F. Scott, Sh. Zhou, L. Han, Y. Su // Nature Communications. – 2015. – V. 6. – Article number 5918. – 9 p. DOI: 10.1038/ncomms6918
16. Beven K.J., Kirkby M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology // Hydrological Science Bulletin. – 1979. – № 24. – P. 43–69.
17. Böhner J., Selige T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation // SAGA-analyses and modelling applications / Eds. J. Böhner, K.R. Mcclay, J. Strobl. – Göttinger: Göttinger Geographische Abhandlungen, 2006. – V. 115. – P. 13–28.
18. A novel multiple flow direction algorithm for computing the topographic wetness index / B. Yong, L.L. Ren, Y. Hong, J.J. Gourley, X. Chen, Y.J. Zhang et al. // Hydrology Research. – 2012. – № 43 (1–2). – P. 135–145.
19. Topography Wetness Index Application in Flood-Risk-Based Land Use Planning / S.H. Pourali, C. Arrowsmith, N. Chrisman et al. // Appl. Spatial Analysis. – 2016. – № 9:39. – P. 39–54. URL: <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2> (дата обращения 23.05.2017).
20. 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.
21. Kopysov S.G., Erofeev A.A., Zemtsov V.A. Estimation of water balance over catchment areas taking into account the heterogeneity of their landscape conditions // International Journal of Environmental Studies. – 2015. – V. 72. – № 3. – P. 380–385. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2015.1010876> (дата обращения 23.05.2017).
22. Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения 23.05.2017).
23. Шашко Д.И. Агроклиматическое районирование СССР. – М.: Колос, 1967. – 336 с.
24. Odum E. P. Fundamentals of Ecology. 3<sup>rd</sup> ed. – Philadelphia (PA): W.B. Saunders Co., 1971. – 574 p.
25. Приходько Н.Н., Щадей В.В., Пицак Д.В. Проблемы рационального природопользования и экологической оптимизации ландшафтов Западной Украины // Проблемы региональной эко-

- логии. Вып. 2. Региональное природопользование: Сб. науч. ст. – Томск: Изд-во «Красное знамя», 1994. – С. 26–35.
26. ГАТО. Ф. 239. Оп. 1. Д. 457. Л. 18–40. URL: <http://peresele-nie.gato.tomica.ru/planning/document-71.html?left=60> (дата обращения 23.05.2017).
27. Раменский Л. Г. Проблемы и методы изучения растительного покрова. Избранные работы. – Л.: Наука, 1971. – 334 с.
28. Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model / T. Hickler, K. Vohland, J. Feehan, P.A. Miller, B. Smith, L. Costa, T. Giesecke, S. Fronzek, T.R. Carter, W. Cramer, I. Kühn, M.T. Sykes // *Global Ecology and Biogeography*. – 2012. – № 21. – P. 50–63.
29. Climate-vegetation modelling and fossil plant data suggest low atmospheric CO<sub>2</sub> in the late Miocene / M. Forrest, J.T. Eronen, T. Utescher, G. Knorr, C. Stepanek, G. Lohmann, T. Hickler // *Climate of the Past*. – 2015. – № 11. – P. 1701–1732. DOI: 10.5194/cp-11-1701-2015.
30. Копысов С.Г. Отражение экосистемных процессов в методе гидролого-климатических расчётов // Отражение био-, гео-, антропоферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове. – Томск: ИД ТГУ, 2015. – С. 417–421.
31. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» // СЗ РФ. 2002. № 2. Ст. 133.

Поступила 27.12.2017 г.

#### Информация об авторах

**Ерофеев А.А.**, кандидат географических наук, доцент кафедры географии геолого-географического факультета Томского государственного университета; доцент кафедры геоинформатики и кадастра Института кадастра, экономики и инженерных систем в строительстве Томского государственного архитектурно-строительного университета.

**Копысов С.Г.**, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; доцент кафедры гидрологии геолого-географического факультета Томского государственного университета.

**Никифоров А.Н.**, младший научный сотрудник лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

UDC 332.362

## LANDSCAPE PHYSICAL APPROACH TO ZONING LAND USE STRUCTURE AT A SMALL WATERSHED

Alexander A. Erofeev<sup>1,2</sup>,  
erofeew@yandex.ru

Sergey G. Kopysov<sup>1,3</sup>,  
wosypok@mail.ru

Artem N. Nikiforov<sup>3</sup>,  
a.nik-n@mail.ru

<sup>1</sup> Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russia.

<sup>3</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS,  
10/3, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia

**The relevance** of the research is caused by the need to optimize the current land use for providing sustainable ecological and social development.

**The aim** of the study is to develop the sustainable and optimal organization of landscape structure on the level of a small watershed to take into account spatially-distributed microclimatic conditions for the most effective their use in accordance with dynamic of natural processes at watershed area.

**The methods:** the synthesis of geophysical research methods, in particular the method of hydro-climatic calculations, with the method of relief quantitative description on the basis of digital elevation models (Geomorphometry). The authors have calculated a number of hydro circulating and solar indicators of relief influence on diversity of landscape conditions of runoff formation. The variety in the growing conditions at different relief forms was accounted on the basis of the method of hydro-climatic calculations with moisture ranges by the Ramenskiy scale integration. They characterize the habitat conditions on the vegetation structure. The automated monitoring of water runoff was organized as well to specify the modelled calculations and some other water-balanced elements at the study area.

**The results.** The optimal distribution of land use types was modeled on the basis of detected diversity at the studied watershed. The watershed ecological capacity was defined according to water consumption. The application of the proposed method allows providing the effective using of landscape resources as well as the sustainable development of natural and social systems. This method should be recommended first of all for lands newly introduced in agriculture and buffer zones of conversation areas.

### Key words:

Land use, landscape physics, water balance, hydro-climatic calculation method, geomorphometry, Western Siberia.

The research was financially supported by the RFBR grants no. 14–05–31121 Mol\_a, 14–05–00700.

### REFERENCES

- Ramamohana Rao P., Suneetha P. Land use Modeling for sustainable rural development. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 2012, vol. 1, no. 5, pp. 519–532.
- Myshlyakov S., Glotov A. «Geoanalitika. Argo» – innovatsionnoe reshenie dlya selskokhozyaystvennogo monitoringa. *Geomatika* [«Geoanalytics. Argo» is an innovative solution for Agricultural Monitoring. Geomatics]. Moscow, Kompaniya Sovzond Publ., 2015. pp. 58–62.
- Dokuchaev V.V. Nashi stepi prezhde i teper [Our steppes in the past and at the present time]. *Izbrannye trudy*. Moscow, AN USSR Press, 1949. pp. 317–438.
- Vodny kodeks Rossiyskoy Federatsii from 03.06.2006 № 74-FZ [The Water Code of the Russian Federation from 03.06.2006 № 74]. *Sobranie zakonodatelstva RF*, 1995 № 47 st. 4471 [Collection of the legislation of the Russian Federation].
- Shmakina A.B., Krenke A.N., Mikhaylov Yu.A., Turkov D.V. Rol landshaftnoy struktury poverkhnosti sushy v klimaticheskoy sisteme [Role of landscape structure of terrestrial surface in climatic system]. *Izvestiya AN USSR. Seriya geograficheskaya*, 2001, no. 4, pp. 38–43.
- Kopysov S.G., Yarlykov R.V. Experience in organization of hydrological and climatic observations on small model catchments of West Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 12, pp. 115–121. In Rus.
- U.S. Geological Survey (USGS). Available at: <http://usgs.gov> (accessed 22 August 2017).
- Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. *An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639*. Pasadena, California, Jet Propulsion Laboratory, 2005. 143 p.
- ASTER GDEM, 2009. Available at: <http://gdem.ersdac.jp/space-systems.or.jp/index.jsp> (accessed 23 May 2017).
- Burrough P., McDonnell R., Lloyd Ch. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford, OUP, 2015. 432 p.
- 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+*. 2017. Available at: [https://sagatutorials.files.wordpress.com/2016/02/saga\\_manual\\_english\\_cdu\\_june-2017.pdf](https://sagatutorials.files.wordpress.com/2016/02/saga_manual_english_cdu_june-2017.pdf) (accessed 23 May 2017).
- Mezentsev V.S. *Gidrologicheskie raschety v meliorativnykh tselnykh* [Hydrological calculations for melioration]. Omsk, Omsk Agricultural Institute Publ., 1982. 80 p.
- Karnatsevich I.V., Mezentseva O.V., Tusupbekov G.A., Bikbulatova G.G. *Vozobnovlyaemye resursy teplolagoobespechennosti*



- 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.
14. Kopysov S.G. 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 Rus.
  15. Zhou G., Wei X., Chen X., Zhou P., Liu X., Xiao Yi., Sun G., Scott D.F., Zhou Sh., Han L., Su Y. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature Communications*, 2015, vol. 6, Article number 5918, 9 p. DOI: 10.1038/ncomms6918
  16. 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.
  17. Böhner J., Selige T. Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. *SAGA-Analyses and modelling applications*. Eds. J. Böhner, K.R. McCloy, J. Strobl. Göttinger, Göttinger Geographische Abhandlungen, 2006, vol. 115, pp. 13–28.
  18. Yong B., Ren L.L., Hong Y., Gourley J.J., Chen X., Zhang Y.J. A novel multiple flow direction algorithm for computing the topographic wetness index. *Hydrology Research*, 2012, no. 43 (1–2), pp. 135–145.
  19. Pourali S.H., Arrowsmith C., Chrisman N. 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> (accessed 23 May 2017).
  20. Erofeev A.A. *Landshaftno-ekologicheskyy analiz basseynov malyykh rek na osnove geoinformatsionnogo modelirovaniya (na primere malyykh rek Tomsk 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. 16 p.
  21. Kopysov S.G., Erofeev A.A., Zemtsov 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. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/00207233.2015.1010876> (accessed 23 May 2017).
  22. *Specializirovannyye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy* [Specialized data for climatic research]. Available at: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (accessed 23 May 2017).
  23. Shashko D.I. *Agroklimaticheskoe rayonirovanie USSR* [Agro climatic zoning of the USSR]. Moscow, Kolos Publ., 1967. 336 p.
  24. Odum E.P. *Fundamentals of Ecology*. 3<sup>rd</sup> ed. Philadelphia (PA), W.B. Saunders Co., 1971. 574 p.
  25. Prikhodko N.N., Shaldehy V.V., Pishchak D.V. Problemy ratsionalnogo prirodopolzovaniya i ekologicheskoy optimizatsii landshaftov Zapada Ukrainy [Issues of rational nature management and ecological optimization of the west of Ukraine landscapes]. *Problemy regionalnoy ekologii. Vypusk 2. Regionalnoe prirodopolzovanie: Sbornik nauchnykh statey* [Problems of regional ecology. Iss. 2. Regional environmental management]. Tomsk, Krasnoe znamya Publ., 1994. pp. 26–35.
  26. *GATO. F. 239. Op. 1. D. 457. L. 18–40*. Available at: <http://pereselenie.gato.tomica.ru/planning/document-71.html?left=60> (accessed 23 May 2017).
  27. Ramensky L.G. *Problemy i metody izucheniya rastitelnogo pokrova. Izbrannyye raboty* [Issues and methods of vegetation cover study]. Leningrad, Nauka Publ., 1971. 334 p.
  28. Hickler T., Vohland K., Feehan J., Miller P.A., Smith B., Costa L., Giesecke T., Fronzek S., Carter T.R., Cramer W., Kühn I. and Sykes M.T. Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, no. 21, pp. 50–63.
  29. Forrest M., Eronen J.T., Utescher T., Knorr G., Stepanek C., Lohmann G., Hickler T. Climate-vegetation modelling and fossil plant data suggest low atmospheric CO<sub>2</sub> in the late Miocene. *Climate of the Past*, 2015, no. 11, pp. 1701–1732. DOI: 10.5194/cp-11-1701-2015
  30. Kopysov S.G. Otrazhenie ekosistemnykh protsessov v metode gidrologo-klimaticheskikh raschetov [Reflection of ecosystem processes in hydro-climatic calculation method]. *Otrazhenie bio-, geo-, antroposfernykh vzaimodeystviy v pochvakh i pochvennom pokrove* [Reflection of bio-, geo- anthropospheric interactions in soils and soil covers]. Tomsk, TGU Publ. house, 2015. pp. 417–421.
  31. Federalnyy zakon ot 10.01.2002 № 7-FZ «Ob okhrane okruzhayushchey sredy» [Federal Law of 10.01.2002 No. 7 On Protection of Environment]. *Sobranie zakonodatelstva RF*, 2002 № 2, st. 133 [Collection of the legislation of the Russian Federation].

Received: 27 December 2017.

#### Information about the authors

**Alexander A. Erofeev**, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University; associate professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

**Sergey G. Kopysov**, Cand. Sc., lead researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS; associate professor, Tomsk State University.

**Artem N. Nikiforov**, junior researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS.