Разработка методологического обеспечения процесса автоматизированного вычисления гидроэнергетического потенциала рек с использованием геоинформационных систем

Аспирант Н.В. Баденко;
к.т.н., заведующий лабораторией «Ледотермика и термика водоемов» Н.С. Бакановичус;
д.г.-м.н., главный научный сотрудник-консультант О.К. Воронков;
к.т.н., заведующий отделом «Геоинформационные системы и технологии» Т.С. Иванов,
ОАО ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева;
главный инженер проекта А.А. Ломоносов,
ОАО «Институт Гидропроект»;
инженер В.А. Олешко,
ОАО ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева;
инженер-программист М.В. Петрошенко,
ЗАО Инженерный Центр «Кронштадт»

Ключевые слова: геоинформационные системы (ГИС); гидроэнергетический потенциал; карта модуля стока; инженерно-геологические критерии

В настоящее время в России проводятся крупномасштабные исследования гидроэнергетического потенциала рек с целью определения перспективных створов для строительства малых ГЭС [1, 2].

Последние масштабные исследования гидроэнергетического потенциала рек России относятся к 1940–1980-м годам: исследования под руководством С.В. Григорьева (1946 год, [3]), А.Н. Вознесенского (1967 год, [4]) и Б.Н. Фельдмана (1989 год, [5]).

В связи с недостаточной изученностью стока рек (особенно в восточных регионах страны), а также недостаточной точностью исходных топографических данных в этих исследованиях оценка гидроэнергетического потенциала носила приближенный характер и была выполнена только для крупных и некоторых средних рек [4]. Кроме того, в связи с большим количеством исследуемых рек (4 702 реки в исследовании А.Н. Вознесенского) выполнявшиеся в 1940–1980 гг. расчеты гидропотенциала требовали больших затрат труда и времени. Так, например, для построения продольных профилей рек Сибири и Дальнего Востока потребовалась ручная обработка 15 000 планшетов карт [4]. Задача по определению гидроэнергетического потенциала малых рек в масштабах всей страны не ставилась из-за еще большего объема работ.

Современные компьютерные технологии, такие как геоинформационные системы (ГИС), позволяют построить инструментарий, обеспечивающий частичную автоматизацию вычисления гидроэнергетического потенциала. Однако для построения инструментария на основе использования ГИС-технологий потребовались выполнение анализа проработок прошлых лет и разработка методологического обеспечения процесса автоматизированного исчисления гидроэнергетического потенциала [3–12].

В настоящей статье сформулированы основные подходы, которые были заложены в инструментарий автоматизированного исчисления гидроэнергопотенциала рек и реализованы авторами на базе ГИС ArcGIS Desktop и написанных модулей для интерактивной обработки данных (ГИС-серверные технологии ESRI). В статье приведено сопоставление площадей водосборов, среднемноголетних расходов и значений валового гидроэнергопотенциала, полученных с использованием описанной методологии и по материалам прошлых лет. Предложенные подходы позволяют выполнить автоматизированную оценку потенциала рек России в современных условиях с использованием актуализированных гидрологических данных и актуальных цифровых моделей местности.

Анализ мирового опыта автоматизированного определения гидроэнергопотенциала

В ряде стран (США, Франция, Италия, Норвегия, Канада, Шотландия и др.) уже произведена оценка гидроэнергетического потенциала рек с использованием ГИС. Краткий обзор подобных исследований приведен в работе [6], также в ней представлены некоторые инструменты, разработанные на базе геоинформационных систем и позволяющие определять валовый потенциал рек (см. таблицу 1).

Таблица 1. ГИС-инструменты, разработанные в различных странах для определения гидроэнергетического потенциала

Разработанные ГИС-инструменты		
Название	**Разработчик**	**Применяются в странах**
Integrated method for power analysis (IMP)	Natural Resources Canada and POWEL	Международный
RETScreen®	Natural Resources Canada	Международный
PEACH	ISL Bureau d'Ingénieurs Conseils, France	Международный
HydropowerEvaluationSoftware (HES)	Department of Energy, Idaho Engineering and Environmental Laboratory, USA	США
SMART MiniIdro	ERSE SpA, Italy	Италия
Hydrohelp	Gordon J.L and OEL-HydroSys, Canada	Международный

Ключевыми исходными данными, без которых невозможна оценка гидроэнергопотенциала, традиционно являются данные по гидрографии (речная сеть), рельефу местности, среднемноголетним расходам реки. В последнее время в качестве этих данных все чаще используются слои электронных карт по рекам, цифровые модели рельефа и рассчитанные значения среднемноголетних расходов с использованием данных по картам модуля стока.

В работе [7] описана методика вычисления доступного к освоению валового и экономического гидроэнергетического потенциала Соединенных Штатов Америки. В исследовании использованы гидрографические данные на основе сети синтетических рек, охватывающей всю территорию США (National Hydrography Dataset [13]), цифровой модели рельефа SRTM [14] и данные о стоке на основе анализа дождевых осадков.

В работе [8] описана расчетная модель, реализованная на базе ArcGIS Desktop и апробированная при вычислении гидроэнергетического потенциала на территории бассейна Тебриз, Иран.

В работе [9] описывается принцип работы ГИС-инструмента Hydropost, с помощью которого проводилась оценка гидроэнергетического потенциала рек в бассейне Такуари-Антас (Taquari-Antas river basin), Бразилия.

В работе [10] описаны исследования по оценке гидроэнергетического потенциала рек Южной Африки с помощью ГИС-технологий.

В работе [11] показан пример использования ГИС для оценки гидроэнергопотенциала, который возможно освоить путем сооружения ГАЭС на существующих водохранилищах (в том числе и неэнергетического назначения) на территории Турции. В радиусе 5 км от существующих плотин на основе ряда критериев осуществлялся поиск территорий, подходящих для создания второго водохранилища (верхнего бьефа), в которое осуществляется перекачка воды во время ночного провала энергопотребления. Таким образом, было обнаружено 448 подходящих для создания ГАЭС территорий, валовый гидроэнергетический потенциал которых составил $4{,}37*10^9$ кВт*ч.

В работе [12] описан процесс выявления перспективных створов малых ГЭС на территории кантона Воуд в Швейцарии с применением ГИС-технологий. В статье описаны исходные данные и методология выявления перспективных створов, приведены результаты расчета их мощности .

В работе [15] описаны процессы работы с модулем ArcHydro, который был использован для моделирования сетей рек в настоящем исследовании.

Цели и задачи исследования

Целью настоящего исследования была разработка и апробация методики и ГИС-инструментов, позволяющих автоматизировать вычисление гидроэнергетического потенциала рек и их отдельных участков.

На основе анализа выполнявшихся ранее работ для реализации автоматизированных инструментов исчисления потенциала на базе ГИС авторами были поставлены следующие задачи:

1) анализ мирового опыта автоматизированного вычисления гидроэнергопотенциала;
2) разработка методики для автоматизированной оценки гидроэнергопотенциала и требований к исходным материалам;
3) сбор и систематизация данных об исследуемых территориях;
4) разработка прикладных инструментов для вычисления гидроэнергетического потенциала на основе ГИС;
5) разработка интерфейса по представлению полученных результатов в ГИС;
6) апробация методики и ГИС-инструментов на примере водохозяйственного участка, имеющего код 13.01.06.001 (Верхнеобский бассейновый округ, река Кеть);
7) верификация полученных результатов.

Разработка методики для автоматизированной оценки гидроэнергопотенциала и требований к исходным материалам

Категории гидроэнергетического потенциала

В соответствии с данными работы [4] можно выделить три основные категории гидроэнергетического потенциала.

Теоретический (валовый, природный) гидроэнергетический потенциал – полная теоретическая сумма энергии речного стока.

Валовый гидроэнергетический потенциал реки может быть определен посредством суммирования потенциалов ее участков:

$$N = \sum_{i=1}^{n} N_i = \sum_{i=1}^{n} [g * (\frac{Q_{Hi} + Q_{Ki}}{2}) * H_i] \ , \qquad (1)$$

где N – валовый потенциал, кВт;
i – номер участка реки;
g – ускорение свободного падения, м/с^2;
Q_{Hi} – расход в начале i-го участка реки, м^3/с;
Q_{Ki} – расход в конце i-го участка реки, м^3/с;
H_i – падение реки на i-м участке реки, м.

В рамках данного исследования границы участков намечаются в местах резкого изменения расхода реки, т. е. в местах впадения притоков [4].

Технический гидроэнергетический потенциал – часть теоретического гидроэнергопотенциала, которая может быть освоена технически.

Экономический гидроэнергетический потенциал – часть технического гидроэнергопотенциала, использование которой является экономически оправданным.

В настоящей статье не рассматривается процесс определения экономического потенциала. Примеры подходов по геоинформационным методам поиска перспективных створов гидроузлов можно найти в работах [9, 11, 12, 16].

Кроме того, исследователи иногда выделяют еще одну категорию гидроэнергопотенциала – ***гидроэнергетический потенциал, доступный к освоению*** [7]. Под этой категорией понимают валовый потенциал только тех участков рек, которые не попадают в исключенные территории.

К исключенным зонам в настоящем исследовании относятся следующие.

1. Особо охраняемые природные территории (ООПТ).

Освоение гидроэнергетического потенциала в пределах ООПТ будет связано с необходимостью изменения их границ, что будет приводить к существенному осложнению согласований проектов.

2. Существующие водохранилища.

Внутри границ существующих водохранилищ потенциал реки уже освоен, следовательно, он должен быть вычтен из общего валового потенциала.

3. Территории, выявленные как неблагоприятные для строительства ГЭС с точки зрения инженерно-геологических условий.

Предлагаемый подход к разбиению территории на расчетные участки

Работы по оценке потенциала выполняются для больших по площади территорий, вследствие чего возникает вопрос о необходимости введения иерархической структуры для упорядочивания данных. Гидрографическая сеть сама по себе является отличным примером иерархической сети, можно сказать, что это самая упорядоченная естественная сеть на планете [17]. Для территории РФ выполнено водохозяйственное районирование, то есть осуществлено разделение территории страны на структурные единицы на основе водосборных площадей рек.

В настоящее время водохозяйственное районирование выполнено с разделением территорий на округа, бассейны, подбассейны и водохозяйственные участки (см. рисунок 1) [18, 19].

В данном исследовании для оценки потенциала предложено использовать бассейново-ландшафтный подход. Преимущество подобного подхода в том, что границы водохозяйственных участков – это естественные водоразделы, что является необходимым условием для определения водосборной площади для рек внутри рассматриваемой территории.

Основной территориальной единицей для расчетов был выбран водохозяйственный участок. Такой выбор обусловлен тем, что малые реки и подавляющее большинство средних рек расположены целиком в одном водохозяйственном участке. Исключение составляет лишь ряд средних рек, которые протекают сразу через несколько участков.

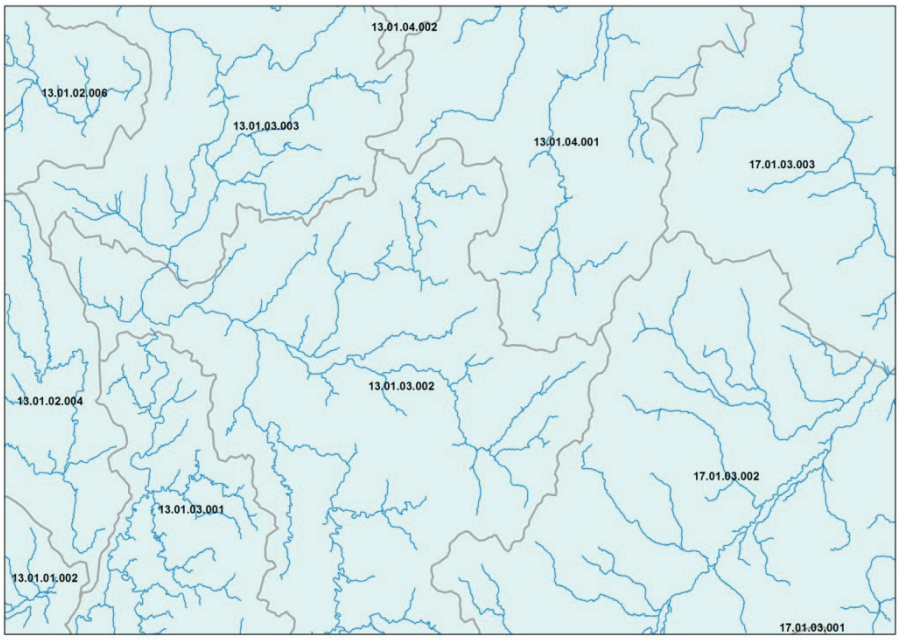

Рисунок 1. Фрагмент водохозяйственного районирования территории РФ

Исходные данные для вычисления валового потенциала

К исходным данным для определения валового потенциала в настоящем исследовании относятся следующие.

1. Сведения о реках по данным водного реестра РФ [20].

Водный реестр представляет собой систематизированный свод документированных сведений о водных объектах, расположенных на территории РФ [21]. В составе базы данных водного реестра содержатся перечни крупных, средних и малых рек в разрезе водохозяйственных участков с указанием мест впадения притоков, длин рек и их площадей водосборов и т. д.

2. Данные о рельефе.

В качестве источников данных о рельефе выступают цифровые модели рельефа. Различные цифровые модели рельефа обладают своими достоинствами и недостатками. Например, покрытие Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) охватывает только территорию южнее 60° с. ш. и севернее 54° ю. ш. [9], а электронные топографические карты, на основе которых можно построить цифровые модели рельефа, не являются бесплатными, и их приобретение в России связано с большим количеством административных процедур.

В настоящей работе были использованы два типа цифровых моделей рельефа:

- на базе слоев электронных карт, масштаб 1:100000;
- SRTM.

3. Данные о расходах рек.

Для определения валового потенциала по формуле (1) необходимо иметь сведения о расходах рек в местах впадения притоков.

Ввиду недостаточной изученности малых и средних водотоков для расчетного обоснования расхода воды был использован метод построения карт модуля среднего многолетнего расхода воды (модуля стока), рекомендованного СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик». Метод основан на допущении плавного изменения годового стока по территории в соответствии с распределением климатических и физико-географических факторов.

При определенном значении модуля стока расход воды в расчетном створе может быть определен по формуле:

$$Q = q * F \ , \qquad (2)$$

где Q – средний многолетний расход воды в расчетном створе, $м^3/с$;
q – осредненный по площади водосбора модуль стока, $л/(с*км^2)$;
F – площадь водосбора, замыкаемая расчетным створом, $км^2$.

В качестве карт модуля стока возможно использование следующих источников данных.

1. Карта модуля стока (1976 год).

Карта модуля стока 1976 года рекомендована для расчетного обоснования гидрологических характеристик для случая отсутствия данных гидрометрических наблюдений не действующим на данный момент СНИП 2.01.14-83 «Определение расчетных гидрологических характеристик». Очевидным недостатком использования карты модуля стока 1976 года является то, что ее построение осуществлено без учета огромного массива данных за прошедшие 36 лет и данных по вновь открытым после 1976 года гидрологическим постам.

2. Актуализированная по состоянию на 2012 год карта модуля стока.

Актуализированная карта модуля стока построена на основе использования всей имеющейся к 2012 году информации, приведенной к многолетнему периоду в соответствии с требованиями СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик».

Авторами было произведено сопоставление использованных карт модуля стока, и оно показало гораздо более высокую степень детализации актуализированной карты модуля стока по сравнению с картой 1976 года. Следует отметить, что построение актуализированной карты модуля стока и сопоставление результатов не описывается в настоящем исследовании и является предметом отдельной статьи.

Алгоритм вычисления валового потенциала

Алгоритм вычисления валового гидроэнергетического потенциала, реализованный в данном исследовании, представлен на рисунке 2.

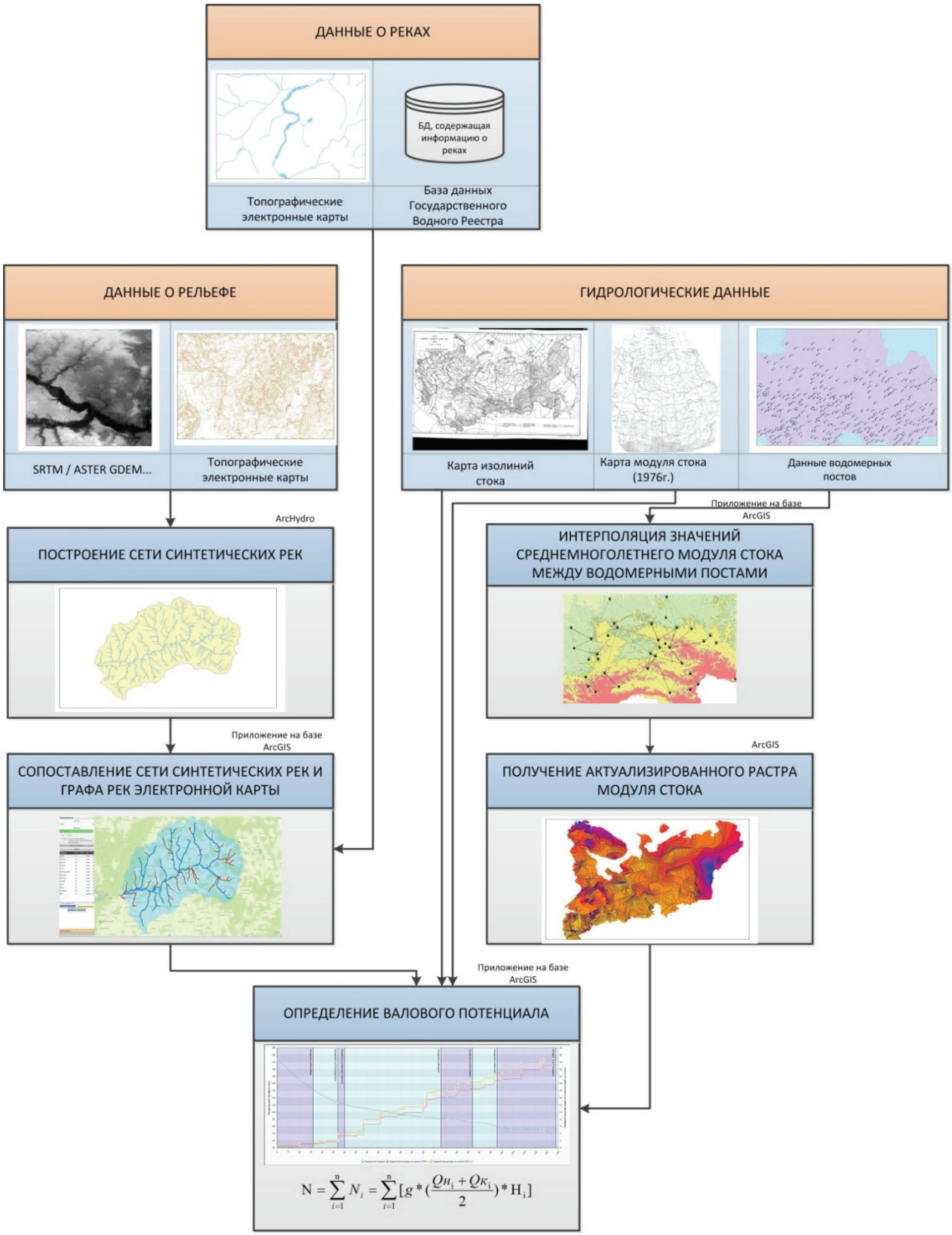

Рисунок 2. Алгоритм вычисления валового гидроэнергетического потенциала

1. Гидрологические данные: подготовка данных о модуле среднего многолетнего расхода воды.

Для оценки гидроэнергопотенциала была реализована возможность использования двух карт модуля стока – актуализированной карты модуля стока и карты 1976 года.

К исходным данным для построения актуализированной карты модуля стока относятся:

- данные наблюдений по водомерным постам (включая фондовые материалы наблюдений за ежедневными расходами воды);
- площади водосборных бассейнов, замыкаемых створами использованных гидрологических постов;
- перечень рассматриваемых рек;
- цифровые модели рельефа, классифицированные по равнинным/среднегорным/горным территориям.

С учетом требований СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик» в специально разработанном приложении на базе web-серверных и ГИС-серверных технологий с использованием элементов автоматизации авторами было выполнено построение карт изолиний для определения параметров распределения годового стока: модуля среднего многолетнего расхода воды, коэффициента вариации, отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации. Обоснованы критерии и параметры применения поправочных коэффициентов к картам параметров распределения для малых рек.

На рисунке 3 представлен фрагмент карты определенных интерполяционных значений на основе использования расчетных значений модуля стока, определенных в центрах тяжести водосборов, замыкаемых створами использованных водомерных постов.

На основе полученных данных по значениям среднемноголетнего модуля стока в центрах тяжести водосборов, замыкаемых створами используемых пунктов, и интерполированных значений с элементами автоматизации были построены растр и изолинии актуализированной карты среднего многолетнего модуля стока.

Применение ГИС-технологий в гидрологических расчетах по мере накопления новой гидрометеорологической информации в последующем позволит проводить обновление и актуализацию карты модуля стока по обширным территориям в относительно сжатые сроки, что откроет новые возможности инженерных гидрологических расчетов при отсутствии данных гидрометрических наблюдений в интересующих расчетных створах.

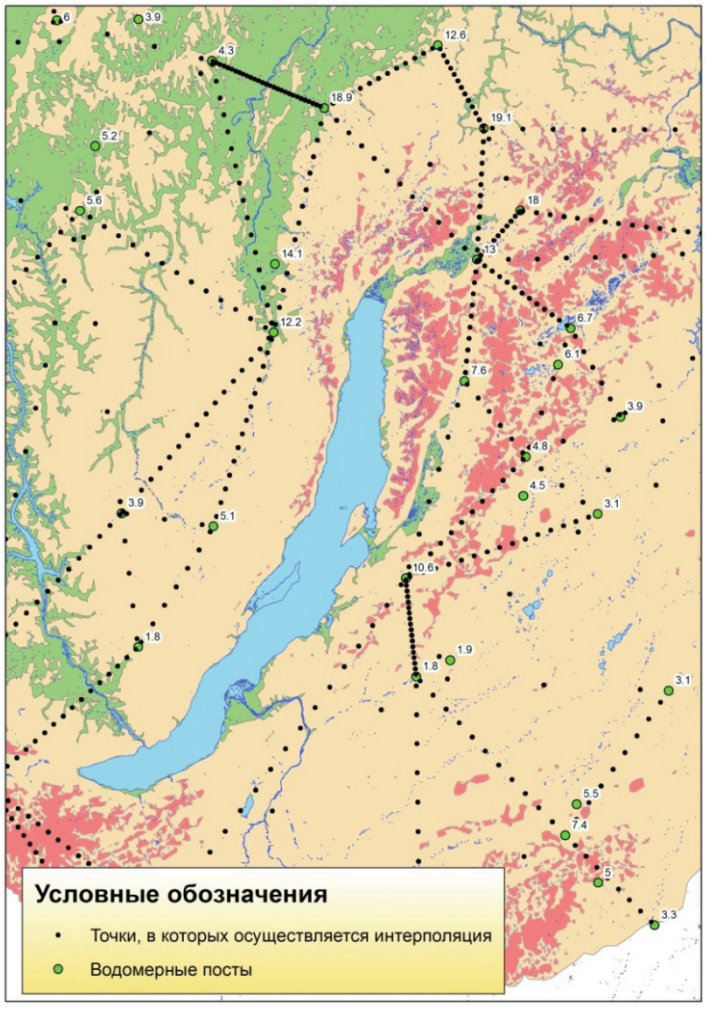

Рисунок 3. Интерполяционные значения среднегодового модуля стока

2. Данные о рельефе и построение сети синтетических рек.

В последнее время для решения задачи построения водосборных площадей и расчета гидроэнергетического потенциала с использованием ГИС применяются математические модели сетей рек, или так называемые «сети синтетических рек» [6–11].

Сеть синтетических рек строится на основе цифровых моделей рельефа; в рамках данного исследования для создания речной сети использовался модуль ArcHydro, дополнительно доработанный в целях исследования (реализована надстройка над этим инструментарием). Помимо синтетических рек генерируются слои водосборных площадей для каждого участка реки, производится вычисление параметров, необходимых для оценки ГЭП (среднемноголетних расходов, падений на участках рек).

Сеть синтетических рек обладает следующими особенностями:

- реки проходят строго по наименьшим отметкам местности на цифровых моделях рельефа;
- реки разбиты на участки в местах впадения притоков;
- реки соединены в сеть (network), т. е. имеется связь между начальной и конечной точками каждого участка, между участками рек и их водосборными площадями и т. д.

На рисунке 4 представлено сопоставление сети синтетических рек, полученной на основе данных SRTM и цифровых топографических карт масштаба 1:100 000. Как видно из рисунка, синтетические реки, полученные обоими способами, хорошо коррелируют между собой.

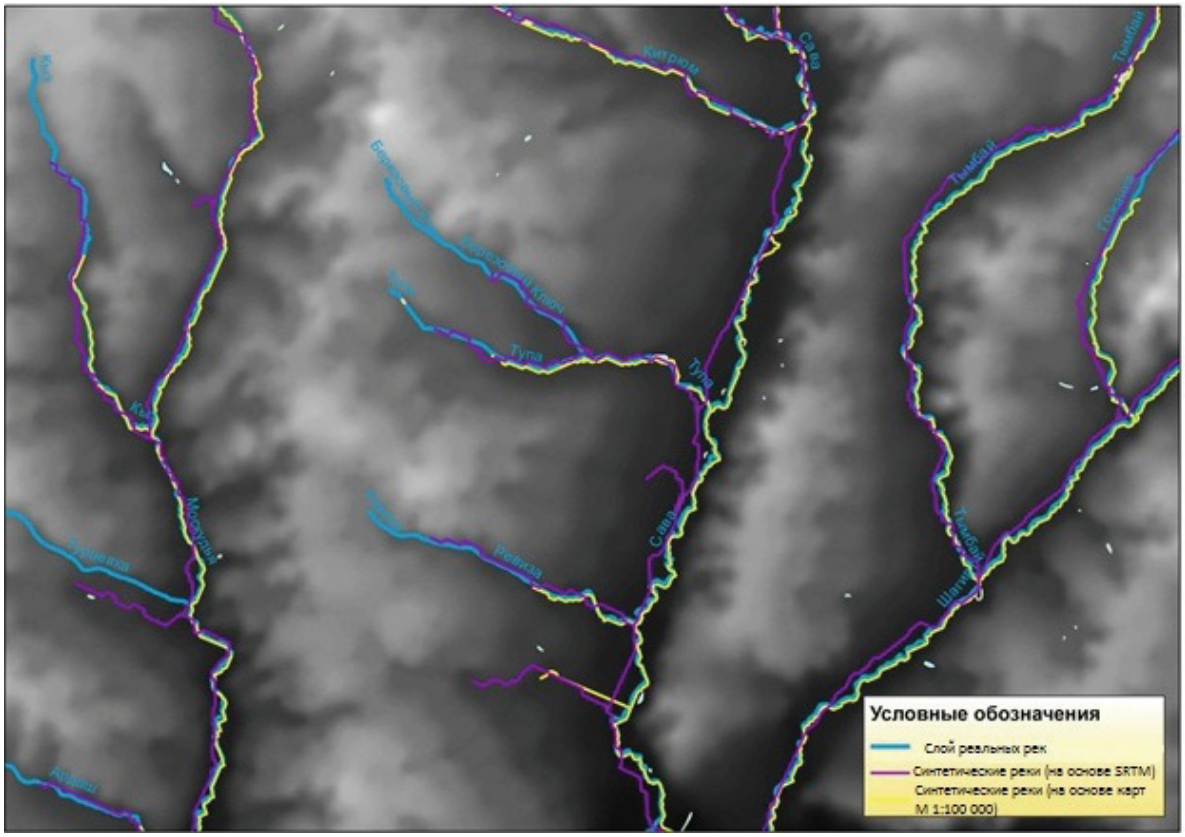

Рисунок 4. Сопоставление сетей реальных и синтетических рек, построенных на основе SRTM, и электронных топографических карт

Стоит отметить, что истоки синтетических рек не совпадают с истоками рек электронной карты. Это объясняется тем, что точное определение истока реки является трудоемким процессом и связано с изысканиями, проводимыми на местности. Длина синтетических рек и густота сети синтетических рек зависят от порогового значения, задаваемого в алгоритме по их построению [22].

3. Сопоставление сети синтетических рек и графа рек электронной карты.

Для сопоставления результатов данной работы с оценками потенциалов прошлых лет при выполнении настоящего исследования была решена задача по автоматизации нахождения соответствия между участками рек электронных карт и участками синтетических рек. Для этих целей было разработано специальное приложение. Результатом работы с приложением является сеть поименованных синтетических рек, которым присвоены длина и площадь водосбора по данным водного реестра.

4. Определение валового гидроэнергопотенциала.

Для участков синтетических рек с присвоенными именами вычисляется валовый гидроэнергетический потенциал в соответствии с формулой (1), где

$$H_i = Hк_i - Hн_i \ . \quad (3)$$

Отметки в начале и в конце участка синтетических рек берутся с цифровых моделей рельефа:

$$Qн_i = qн_i * Fн_i \ , \quad (3)$$

$$Qк_i = qк_i * Fк_i \ .$$

Значения модулей стока в начале и конце участка являются осредненными значениями ячеек растра модуля стока внутри соответствующей водосборной площади, замыкаемой в соответствующей точке.

Исходные данные для вычисления потенциала, доступного к освоению

В настоящем исследовании для определения доступного к освоению гидроэнергетического потенциала использованы следующие исходные данные.

1. Особо охраняемые природные территории. В качестве данных использованы векторные данные по ООПТ, размещенные на ГИС-портале [23].

2. Существующие водохранилища. В качестве источника данных о существующих водохранилищах использованы соответствующие объекты из слоя гидрографии электронных карт, масштаб 1:100 000.

3. Территории, выявленные как неблагоприятные для строительства ГЭС с точки зрения инженерно-геологических условий. Такие территории определялись на основе экспертной оценки в соответствии с нормативными, литературными и фондовыми материалами, а также инженерно-геологическими и геологическими картами масштаба 1:5 000 000 и 1:200 000.

Были разработаны критерии, в соответствии с которыми определялись неблагоприятные инженерно-геологические зоны:

1) наличие тектонического разлома I и II порядка (по классификации СНиП 2.02.02-85*);
2) наличие тектонического разлома III порядка, ориентированного вдоль русла;
3) максимальное расчетное землетрясение на участке реки превышает 9 баллов по шкале MSK-64;
4) градиенты скорости современных тектонических движений в геодинамических зонах более $10^{-6}с^{-1}$; скорости вертикальных движений земной коры более 15 мм/год;
5) наличие крупных карстовых пустот;
6) оползнеопасные береговые примыкания; наличие курумов мощностью более 5 м;
7) наличие подземных льдов (повторно-жильных, пластовых и др.) в днищах долин и береговых примыканиях;
8) наличие очень слабых грунтов в основании и береговых примыканиях (торфа, сапропели, лессы, илы, текучие супеси, суглинки и глины, монтмориллонитовые глины, плывунные суффозионно-неустойчивые пески и супеси);
9) наличие сильнопросадочных и чрезвычайно просадочных грунтов (лессы и др.);
10) наличие сильнонабухающих грунтов (переуплотненные глинистые породы, содержащие монтмориллонит или органические вещества).

Алгоритм вычисления потенциала, доступного для освоения

Алгоритм вычисления потенциала, доступного для освоения, представлен на рисунке 5.

1. Сбор информации об «исключенных» зонах.
2. Осуществление пространственного пересечения слоя синтетических рек и слоев исключенных зон.
3. Из определенного ранее суммарного валового потенциала для каждой реки вычитается потенциал участков, попавших в исключенные зоны.

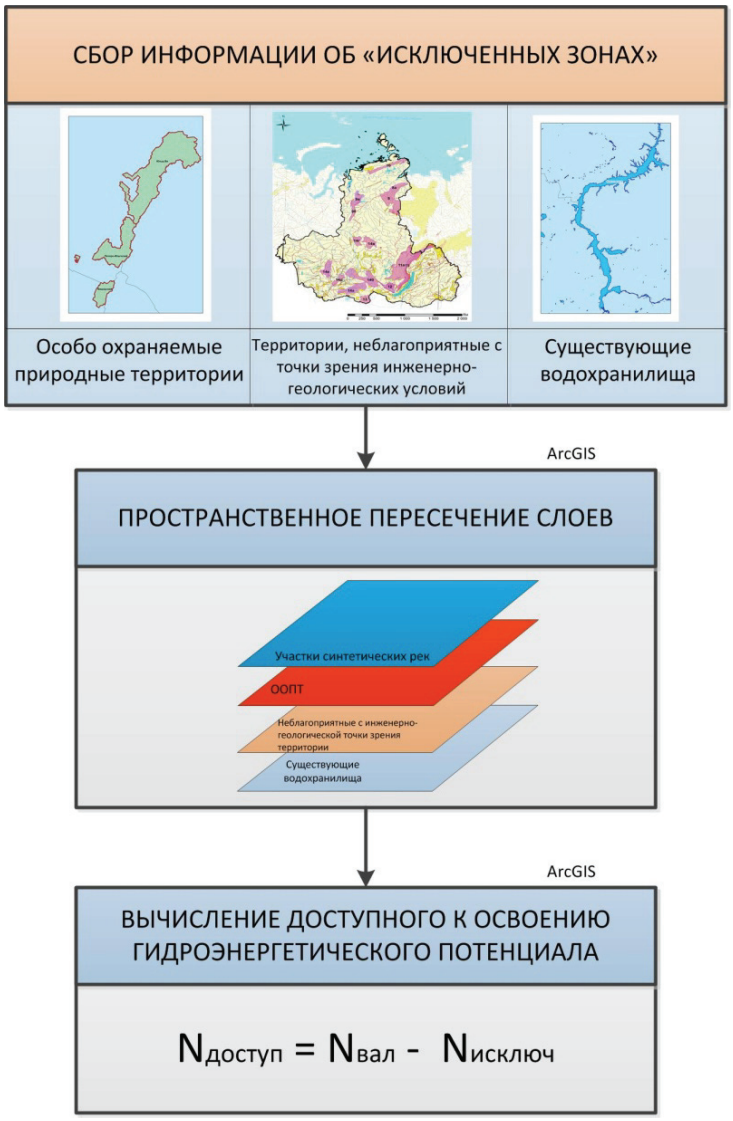

Рисунок 5. Алгоритм вычисления доступного для освоения гидроэнергетического потенциала

Вычисление технического потенциала

Экспресс-оценка технического гидроэнергопотенциала в рамках данного исследования выполнена путем умножения валового потенциала рек на соответствующий коэффициент использования валового потенциала, который зависит от мощности реки. Реки России условно разделялись на три группы по мощности [5]:

1) N < 2 МВт (коэффициент использования валового потенциала K_i может быть принят 0,15–0,20);
2) 2 МВт < N < 100 МВт (K_i = *0,35*);
3) N > 100 МВт.

Для третьей группы рек коэффициент использования валового потенциала Ki составляет 0,6 для горных рек; 0,5 – для предгорных рек; 0,4 – для равнинных рек. В качестве критерия «горности» в данной работе применяется оценка уклона на участке:

- менее 1,0 м на 1 км – равнинная;
- от 1,0 м до 2,5 м на 1 км – предгорная;
- более 2,5 м на 1 км – горная.

Апробация предложенной методики вычисления гидроэнергетического потенциала в ГИС

Для апробации методики был выбран участок 13.01.06.001. Данный водохозяйственный участок относится к Верхнеобскому бассейновому округу, по сути, он является водосбором реки Кеть. Выбор данного участка обусловлен возможностью сопоставления вычисленного в настоящем исследовании валового гидропотенциала реки Кеть с результатами, представленными в работе [4, с. 89], а также наличием данных о расходах и водосборных площадях некоторых притоков реки Кеть.

При апробации методики и созданных ГИС-инструментов были выполнены следующие задачи.

1. Построена сеть синтетических рек (см. рисунок 6).

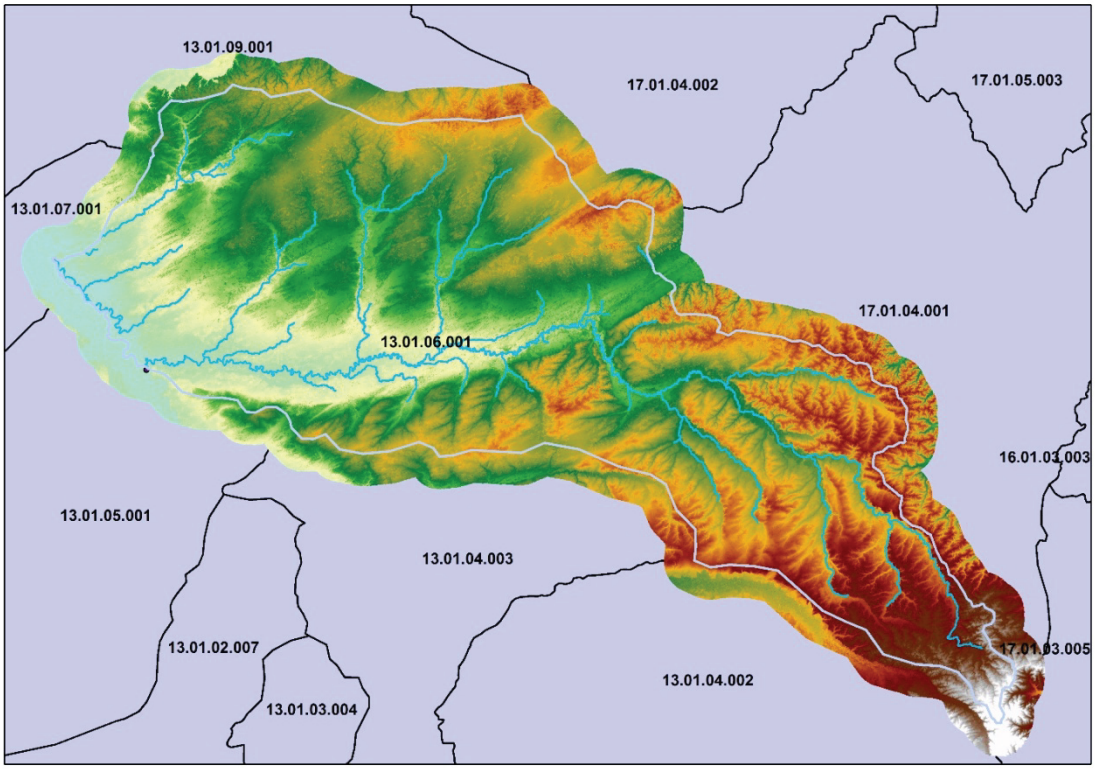

Рисунок 6. Сеть синтетических рек, построенная для водохозяйственного участка 13.01.06.001

2. Синтетическим рекам были присвоены названия в соответствии со слоем рек электронных карт, площади водосбора – по данным водного реестра (см. рисунок 7).
3. Произведен автоматический расчет гидроэнергетического потенциала всех созданных синтетических рек.

Результаты работы по вычислению валового гидроэнергетического потенциала для рек внутри водохозяйственного участка 13.01.06.001 представлены на рисунке 8. Разработанный алгоритм обладает достаточно высокой скоростью обработки данных – расчет 81-го участка синтетических рек для данного водохозяйственного участка площадью более 90 000 км^2 занимает около полутора минут.

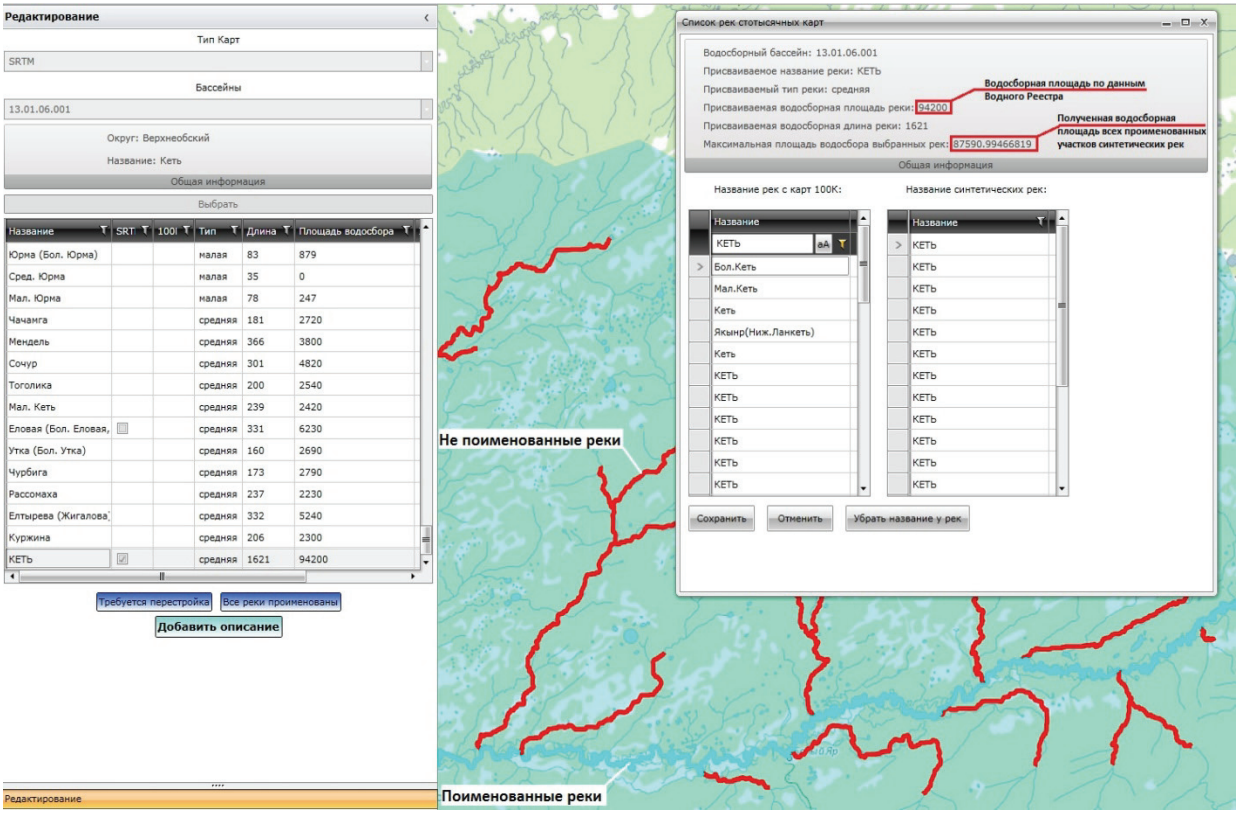

Рисунок 7. Процесс присвоения имен синтетическим рекам

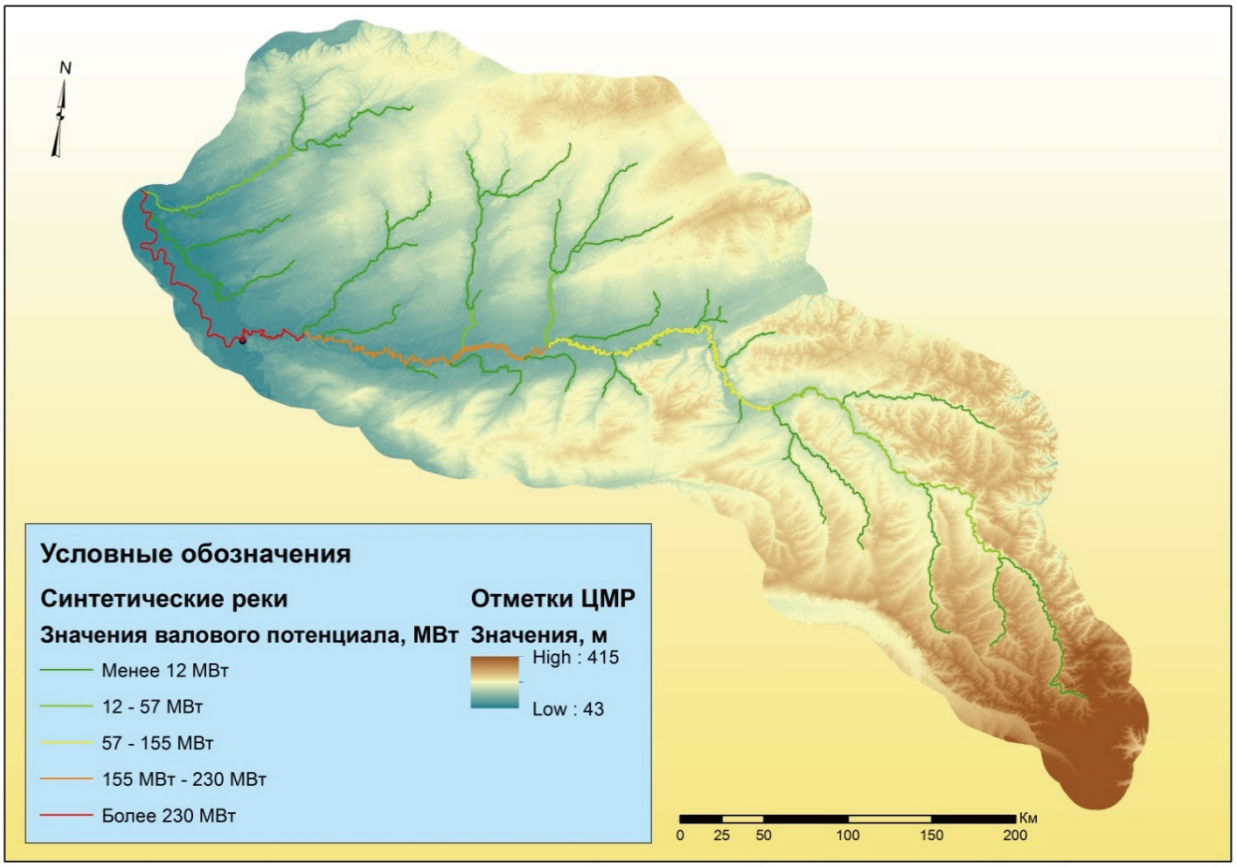

Рисунок 8. Результаты расчета гидроэнергетического потенциала внутри участка 13.01.06.001

Баденко Н.В., Бакановичус Н.С., Воронков О.К., Иванов Т.С., Ломоносов А.А., Олешко В.А., Петрошенко М.В. Разработка методологического обеспечения процесса автоматизированного вычисления гидроэнергетического потенциала рек с использованием геоинформационных систем

Далее с помощью специально разработанного приложения возможно автоматизированное построение кадастровых характеристик рек: реализовано построение продольных профилей по реке, графиков нарастания среднемноголетнего расхода, нарастания мощности реки, изменения удельной мощности. На графиках показан продольный профиль реки и нарастание расхода по длине (см. рисунок 9), а также изменение потенциала вдоль реки (см. рисунок 10).

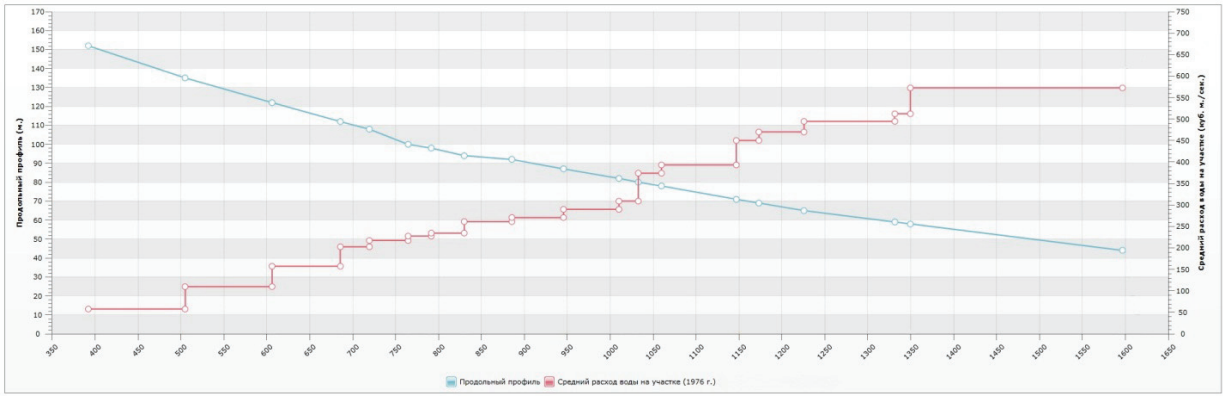

Рисунок 9. Продольный профиль (голубая линия) и нарастающий по длине расход (красная линия) р. Кеть (построено автоматически)

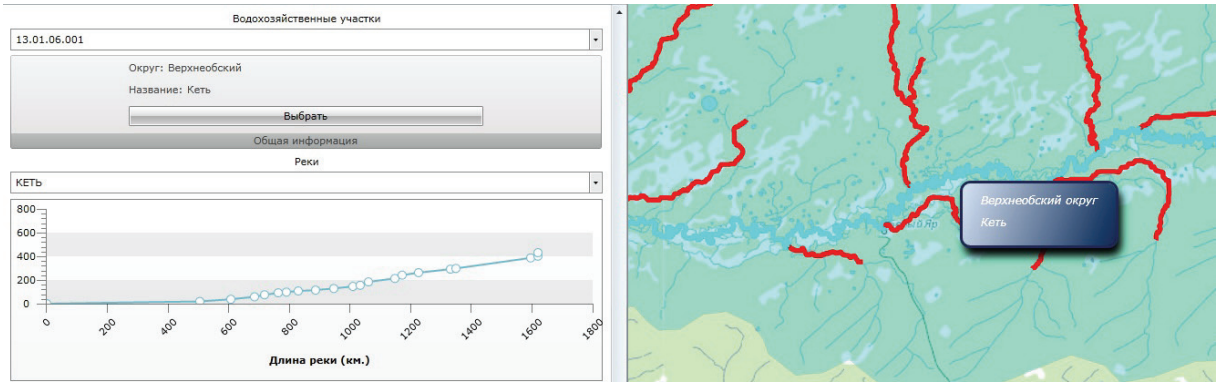

Рисунок 10. Валовый потенциал р. Кеть нарастающим итогом (построено автоматически)

4. Внутри рассматриваемого участка не находятся зоны ООПТ, отсутствуют существующие водохранилища. В связи с этим доступный к освоению потенциал оказался равным валовому потенциалу рек.
5. Для каждого участка синтетических рек в автоматическом режиме был найден соответствующий коэффициент использования валового потенциала и определен технический потенциал.
6. Проведена верификация полученных результатов, включающая в себя следующее.

   6.1. Верификация полученных площадей водосбора.

Вычисленные значения площади водосборов сравнивались с данными о площадях водосбора, содержащимися в базе данных государственного водного реестра РФ [17] (см. таблицу 2).

Таблица 2. Верификация полученных площадей водосбора

Название реки	Рассчитанная площадь водосбора, км^2	Площадь водосбора по данным государственного водного реестра, км^2	Расхождение, %
Орловка	8804	9010	2,3
Чурбига	2647	2790	5,1
Кельма	1347	1390	3,1
Сочур	5079	4820	5,1
Еловая	6067	6230	4,0
Кеть	87591	94200	7,0

6.2. Верификация полученных устьевых расходов рек.

Верификация полученных в соответствии с актуализированной картой модуля стока значений расходов осуществлялась путем их сравнения с показаниями водомерных постов, а также с архивными данными (см. таблицу 3).

Таблица 3. Верификация полученных устьевых расходов

Название реки	Рассчитанный расход, $м^3/с$	Расход в соответствии с актуальными данными водомерных постов, $м^3/с$	Расход в соответствии с данными работы [4], 1967 г., $м^3/с$	Расхождение рассчитанных значений с актуальными данными, %
Орловка	62,0	63,5	-	2,3
Кеть	572,5	560	531	2,1

6.3. Верификация полученного значения валового потенциала.

Полученное значение валового гидроэнергетического потенциала для реки Кеть сравнивалось с данными работы [4], в которой расчет гидроэнергетического потенциала осуществлялся по стволу реки без учета притоков. Сравнение результатов показано в таблице 4.

Таблица 4. Верификация валового гидропотенциала

Название реки	Рассчитанный валовый ГЭП, МВт	Валовый ГЭП по данным работы [4], МВт	Расхождение, %
Кеть	284,2	243	14,5

Расхождение в значениях полученного потенциала и потенциала, приведенного в работе [4], связано с уточнением данных по гидрологии (увеличилась продолжительность рядов наблюдений), а также с тем, что использование цифровых моделей рельефа при определении площадей водосборов может давать некоторые отличия по сравнению с использованными ранее подходами по построению границ водосборных бассейнов.

Также в настоящем исследовании осуществлялся расчет валового гидроэнергетического потенциала как по стволу реки, так и по всему бассейну. В этом случае гидропотенциал бассейна реки Кеть составил 386,7 МВт.

Выводы

1. Созданные ГИС-инструменты могут быть использованы для пересчета и уточнения гидропотенциала территории РФ. Верификация полученных результатов путем их сравнения с архивными материалами, а также с данными водного реестра РФ подтвердила достоверность результатов расчета. К настоящему моменту проведена верификация методики для 300 устьев рек и более 100 водомерных постов, которая показала хорошую сходимость результатов автоматизированного вычисления с архивными данными.
2. Достоинством реализованного метода является возможность выполнения оценки гидроэнергетического потенциала не только в разрезе водохозяйственных участков, но и в разрезе административного деления (благодаря учету принадлежности каждого участка синтетической реки к субъекту РФ).
3. Разработанные ГИС-инструменты позволяют в значительной мере автоматизировать процессы вычислений, что, в свою очередь, позволит оценивать гидропотенциал крупных территорий в относительно короткие сроки.

Литература

1. Программа развития малой гидроэнергетики РусГидро [Электронный ресурс]. URL: http://www.rushydro.ru/industry/res/tidal/ (дата обращения: 15.04.2013)
2. Шестопалов П.В. Почему гидроэнергетический потенциал Северного Кавказа используется лишь на треть? // Энергополис. 2012. №7–8. С. 36–37. URL: http://energypolis.ru/portal/2012/1484-pochemu-gidroyenergeticheskij-potencial-severnogo.html. (дата обращения: 05.09.2013).
3. Григорьев С.В. Потенциальные энергоресурсы малых рек СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1946. 115 с.
4. Вознесенский А.Н. Энергетические ресурсы СССР. М.: Наука, 1967. 598 с.
5. Фельдман Б.Н., Михайлов Л.П., Марканова Т.К. Малая гидроэнергетика. М.: Энергоиздат, 1989. 184 с.

6. Punys P., Dumbrauskas, A., Kvaraciejus A., Vyciene G. Tools for small hydropower plant resource planning and development: A review of technology and applications // Energies. 2011. Vol. 4(9). Pp. 1258–1277.
7. Hall D.G., Cherry S.J., Reeves K.S., Lee R.D., Carroll G.R., Sommers G.L., Verdin K.L. Water Energy Resources of the United States with Emphasis on Low Head/Low Power Resources / Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2004. URL: http://hydropower.inel.gov/resourceassessment/pdfs/03-11111.pdf (дата обращения: 18.04.2013).
8. Feizizadeh B., Haslauer E.M. GIS-based procedures of hydropower potential for Tabriz basin, Iran // GI_Forum 2012, Salzburg, Asutria. July 3–6, 2012. Pp. 492–502.
9. Dante G. Larentis, Walter Collischonn, Francisco Olivera, Carlos E.M. Tucci. Gis-based procedures for hydropower potential spotting // Energy. 2010. Vol. 35. Pp. 4237–4243.
10. Ballance A., Stephenson D., Chapman R. A., Muller J. A geographic information systems analysis of hydro power potential in South Africa // Journal of Hydroinformatics. 2000. Vol. 2. No.4. Pp. 247–254.
11. Fitzgerald N., Arántegui R., McKeogh E., Leahy P. A GIS-based model to calculate the potential for transforming conventional hydropower schemes and non-hydro reservoirs to pumped hydropower schemes // Energy. 2012. Vol. 41. Pp. 483–490 pp.
12. Félix J., Dubas A. Use of GIS to identify potential sites for small hydroelectric plants: general concepts and example of application [Электронный ресурс]. URL: http://www.stucky.ch/en/contenu/pdf/GIS_to_identify_potential_sites_for_small_hydroelectric.pdf (дата обращения: 30.08.2013).
13. National Hydrography Dataset (USA) [Электронный ресурс]. URL: http://nhd.usgs.gov/index.html (дата обращения: 30.08.2013).
14. SRTM 90m Digital Elevation Data [Электронный ресурс]. URL: http://srtm.csi.cgiar.org/.
15. Maidment D.R. ArcHydro: GIS for Water Resources; ESRI Press: Redlands, CA, USA, 2002. P. 220.
16. Баденко Н.В., Иванов Т.С., Олешко В.А. Геоинформационные методы поиска перспективных створов для строительства ГЭС // Инженерно-строительный журнал. 2013. №4(39). С. 70–82.
17. Трифонова Т.А. Бассейновый подход при изучении и картографировании горных ландшафтов, ЭРБ-2002, Владимир, 2002. С. 43–48.
18. Приказ МПР РФ от 25 апреля 2007 г. №112 «Об утверждении Методики гидрографического районирования территории Российской Федерации».
19. Водный кодекс Российской Федерации (от 3 июня 2006 г.) №74-ФЗ.
20. Электронный каталог рек РФ, Государственный Водный реестр [Электронный ресурс]. URL: http://textual.ru/gvr/ (дата обращения: 05.09.2013).
21. Постановление Правительства РФ №253 от 28 апреля 2007 года «Положение о ведении государственного водного реестра».
22. Comprehensive Terrain Preprocessing Using Arc Hydro Tools. Esri press, 2008.
23. Фролов И.Е., Данилов А.И., Дмитриев В.Г., Герасимова Т.М. Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» – лидер российской полярной науки [Электронный ресурс]. URL: http://www.aari.nw.ru/main.php?lg=0 (дата обращения: 05.09.2013).

Николай Владимирович Баденко, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)885-44-88; эл. почта: gamxnguns@gmail.com

Наталья Симовна Бакановичус, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)493-93-13: эл. почта: BakanovichusNS@vniig.ru

Олег Константинович Воронков, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)493-93-90; эл. почта: VoronkovOK@vniig.ru

Тимофей Сергеевич Иванов, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(961)804-50-77; эл. почта: ivanovtim@gmail.com

Алексей Анатольевич Ломоносов, Москва, Россия
Тел. раб.: +7(495)727-36-05; office@moshp.ru

Вячеслав Алексеевич Олешко, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(960)261-97-57, эл. почта: vyacheslavoleshko@gmail.com

Максим Владимирович Петрошенко, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)493-93-17; эл. почта: maxpetroshenko@gmail.com

© Баденко Н.В., Бакановичус Н.С., Воронков О.К., Иванов Т.С., Ломоносов А.А., Олешко В.А., Петрошенко М.В., 2013

Баденко Н.В., Бакановичус Н.С., Воронков О.К., Иванов Т.С., Ломоносов А.А., Олешко В.А., Петрошенко М.В. Разработка методологического обеспечения процесса автоматизированного вычисления гидроэнергетического потенциала рек с использованием геоинформационных систем

doi: 10.5862/MCE.41.7

Development of methodological support of the automated hydropower potential calculation using geographic information systems

N.V. Badenko
JSC "B.E. Vedeneev VNIIG", Saint-Petersburg, Russia
+7(921)885-44-88; e-mail: gamxnguns@gmail.com
N.S. Bakanovichus
JSC "B.E. Vedeneev VNIIG", Saint-Petersburg, Russia
+7(812)493-93-13; e-mail: BakanovichusNS@vniig.ru
O.K. Voronkov
JSC "B.E. Vedeneev VNIIG", Saint-Petersburg, Russia
+7(812)493-93-90; e-mail: VoronkovOK@vniig.ru
T.S. Ivanov
JSC "B.E. Vedeneev VNIIG", Saint-Petersburg, Russia
+7(961)804-50-77; e-mail: ivanovtim@gmail.com
A.A. Lomonosov,
JSC "Institute Hydroproject", Moscow, Russia
+7(495)727-36-05; e-mail: office@moshp.ru
V.A. Oleshko,
JSC "B.E. Vedeneev VNIIG", Saint-Petersburg, Russia
+7(960)261-97-57, e-mail: vyacheslavoleshko@gmail.com
M.V. Petroshenko,
Engineering Centre "Kronstadt" Ltd., Saint-Petersburg, Russia
+7(812)493-93-17; e-mail: maxpetroshenko@gmail.com

Key words

geographic information systems (GIS); hydropower potential; map of drain module; engineering-geological criteria

Abstract

The latest large-scale researches of hydropower potential of large and medium size rivers in Russia were conducted in 1940–1980 years. Nowadays updating of hydropower potential data (including not only large, but also minor and medium rivers) is carried out.

This paper is dedicated to the development and approbation of methodology and GIS-based tools for calculating hydropower potential of rivers, located in Russian Federation. The list of initial data and information sources used in research were described.

The approaches and GIS-tools described in present paper allow executing an assessment of hydropower potential of the rivers in a short time on large areas.

References

1. *Programma razvitiya maloy gidroenergetiki RusGidro* [Small hydropower engineering development program RusHydro]. [Online resource]. URL: http://www.rushydro.ru/industry/res/tidal/ (accessed: April 15, 2013). (rus)
2. Shestopalov P.V. *Energopolis*. 2012. No.7–8. Pp. 36–37. URL: http://energypolis.ru/portal/2012/1484-pochemu-gidroyenergeticheskij-potencial-severnogo.html. (accessed: September 5, 2013). (rus)
3. Grigoryev S.V. *Potentsialnyye energoresursy malykh rek SSSR* [Potential energy resources of minor rivers of USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1946. 115 p. (rus)
4. Voznesenskiy A.N. *Energeticheskiye resursy SSSR* [Energy resources of USSR]. Moscow: Nauka, 1967. 598 p. (rus)
5. Feldman B.N., Mikhaylov L.P., Markanova T.K. *Malaya gidroenergetika* [Small hydropower engineering]. Moscow: Energoizdat, 1989. 184 p. (rus)

6. Punys P., Dumbrauskas A., Kvaraciejus A., Vyciene G. Tools for small hydropower plant resource planning and development: A review of technology and applications. *Energies.* 2011. Vol. 4(9). Pp. 1258–1277.
7. Hall D.G., Cherry S.J., Reeves K.S., Lee R.D., Carroll G.R., Sommers G.L., Verdin K.L. *Water Energy Resources of the United States with Emphasis on Low Head/Low Power Resources.* Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2004. URL: http://hydropower.inel.gov/resourceassessment/pdfs/03-11111.pdf (accessed: April 18, 2013).
8. Feizizadeh B., Haslauer E.M. *GIS-based procedures of hydropower potential for Tabriz basin, Iran.* GI_Forum 2012, Salzburg, Asutria. July 3–6, 2012. Pp. 492–502.
9. Dante G. Larentis, Walter Collischonn, Francisco Olivera, Carlos E.M. Tucci. Gis-based procedures for hydropower potential spottin. *Energy.* 2010. Vol. 35. Pp. 4237–4243.
10. Ballance A., Stephenson D., Chapman R. A., Muller J. A geographic information systems analysis of hydro power potential in South Africa. *Journal of Hydroinformatics.* 2000. Vol. 2. No.4. Pp. 247–254.
11. Fitzgerald N., Arántegui R., McKeogh E., Leahy P. A GIS-based model to calculate the potential for transforming conventional hydropower schemes and non-hydro reservoirs to pumped hydropower schemes. *Energy.* 2012. Vol. 41. Pp. 483–490.
12. Félix J., Dubas A. *Use of GIS to identify potential sites for small hydroelectric plants: general concepts and example of application* [Online resource]. URL: http://www.stucky.ch/en/contenu/pdf/GIS_to_identify_potential_sites_for_small_hydroelectric.pdf (accessed: August 30, 2013).
13. *National Hydrography Dataset (USA)* [Online resource]. URL: http://nhd.usgs.gov/index.html (accessed: August 30, 2013).
14. *SRTM 90m Digital Elevation Data* [Online resource]. URL: http://srtm.csi.cgiar.org/.
15. Maidment D.R. *ArcHydro: GIS for Water Resources*; ESRI Press: Redlands, CA, USA, 2002. P. 220.
16. Badenko N.V., Ivanov T.S., Oleshko V.A. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No.4(39). Pp. 70–82.. (rus)
17. Trifonova T.A. *Basseynovyy podkhod pri izuchenii i kartografirovanii gornykh landshaftov, ERB-2002* [Pool-type approach in examination and mapping of mountainous landscape, ERB-2002]. Vladimir, 2002. Pp. 43–48. (rus)
18. *Prikaz MPR RF ot 25 aprelya 2007 g. №112 «Ob utverzhdenii Metodiki gidrograficheskogo rayonirovaniya territorii Rossiyskoy Federatsii»* [The order of Ministry of Natural Resources of Russian Federation of 25 April 2007, No.112 “About approval of method of hydrographic zoning of the territory of Russian Federation]. (rus)
19. *Vodnyy kodeks Rossiyskoy Federatsii (ot 3 iyunya 2006 g.) №74-FZ* [Water code of Russian Federation (of 3 June 2006) No.74-FZ]. (rus)
20. *Elektronnyy katalog rek RF, Gosudarstvennyy Vodnyy reyestr* [Electronic catalog of rivers of Russian Federation, State Water Register]. [Online resource]. URL: http://textual.ru/gvr/ (accessed: September 5, 2013) (rus)
21. *Postanovleniye Pravitelstva RF №253 ot 28 aprelya 2007 goda «Polozheniye o vedenii gosudarstvennogo vodnogo reyestra»* [Government regulation of Russian Federation No.253 of 28 April 2007 “Statute of management of State Water Register”]. (rus)
22. *Comprehensive Terrain Preprocessing Using Arc Hydro Tools*. Esri press, 2008.
23. Frolov I.E., Danilov A.I., Dmitriyev V.G., Gerasimova T.M. *Gosudarstvennyy nauchnyy tsentr «Arkticheskiy i antarkticheskiy nauchno-issledovatelskiy institut» – lider rossiyskoy polyarnoy nauki* [State scientific center “Arctic and antarctic research institute]. [Online resource]. URL: http://www.aari.nw.ru/main.php?lg=0 (accessed: September 5, 2013) (rus)

Full text of this article in English: pp. 62–76