

## Геоинформационные методы поиска перспективных створов для строительства ГЭС

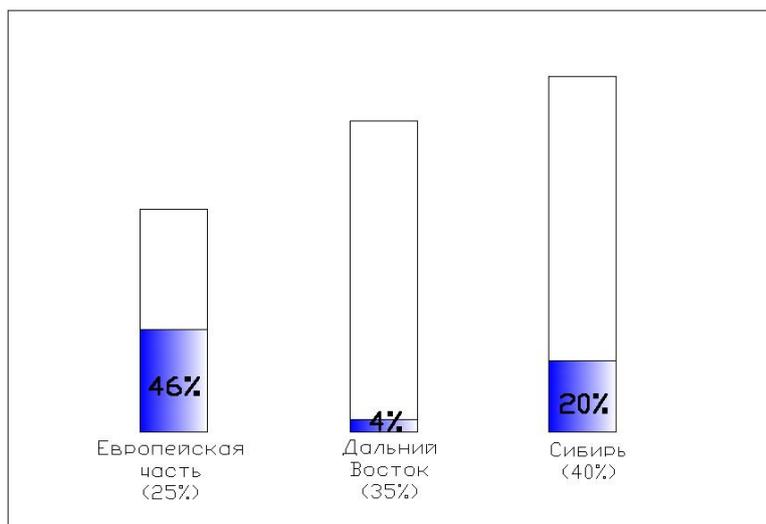
*К.т.н., заведующий отделом «Геоинформационные системы и технологии» Т.С. Иванов\*;  
инженер-программист Н.В. Баденко,  
ОАО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева»;  
магистр В.А. Олешко,  
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»*

**Ключевые слова:** геоинформационные системы (ГИС); многокритериальный анализ; гидроэлектростанция (ГЭС); перспективные створы ГЭС; принятие решений

Строительство ГЭС является востребованной отраслью энергетики, интенсивно развивающейся в настоящее время. В России на данный момент ГЭС и ГАЭС вырабатывают около 16% электроэнергии страны [1, с. 6].

По величине экономического гидроэнергетического потенциала (ГЭП) Россия занимает второе место в мире, уступая только Китаю [2]. Однако процент освоения ГЭП в России невелик по сравнению с другими экономически развитыми странами – около 23,4% [3].

Следует отметить, что распределение гидроэнергетических ресурсов по территории России неравномерно. На ее европейскую часть приходится 25%, на Сибирь – 40% и на Дальний Восток – 35%. В наиболее промышленно развитой части страны – центре европейской части – освоено около 46% гидроэнергоресурсов, в Сибири – 20%, а на Дальнем Востоке – 4% (см. рисунок 1).



**Рисунок 1. Распределение ГЭП по территории РФ. В скобках указан процент от общего ГЭП России. Закрашенные части показывают, какой процент ГЭП освоен в данном регионе**

Большая часть гидропотенциала России сосредоточена в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке — в бассейнах Енисея, Лены и Амура. В европейской части страны возможно освоение недоиспользованной части гидропотенциала путем строительства средних и малых ГЭС, особенно на Северном Кавказе, в северо-западных регионах и на Урале.

В настоящее время проводятся масштабные исследования гидроэнергетического потенциала малых и средних рек, призванные выявить местоположение перспективных створов, а также в первом приближении оценить их выработку и экономическую эффективность. Прогноз предусматривает в период до 2025 г. ввод малых ГЭС общей установленной мощностью свыше 850 МВт. При этом оптимистичная оценка возможностей строительства малых ГЭС в рассматриваемый период на порядок превышает этот уровень [4].

В настоящей статье описывается разработанная методика выбора местоположения перспективных створов ГЭС на равнинных реках. От выбора этого местоположения зависят эффективность освоения гидроэнергетического потенциала, стоимость создания ГЭС и ее народнохозяйственный эффект.

Иванов Т.С., Баденко Н.В., Олешко В.А. Геоинформационные методы поиска перспективных створов для строительства ГЭС

Из-за сжатых сроков выполнения работ, больших площадей исследуемых территорий и большого числа критериев, влияющих на выбор створов, возникает необходимость в использовании современных подходов и технологий для решения поставленной задачи.

Актуальность задачи по разработке методов выявления перспективных створов для строительства ГЭС обеспечивается востребованностью гидроэнергетики, возрастающими потребностями в электроэнергии, а также необходимостью эффективного освоения ГЭП страны.

### ***Проблема поиска наилучшего местоположения створа для строительства ГЭС***

Выбор местоположения створов перспективных ГЭС традиционно основывался на анализе множества факторов (например, топографических, гидрологических, геологических условий, близости к объектам инфраструктуры и т. д.). В общем случае можно говорить о том, что критерии, определяющие решения по выбору места для строительства ГЭС, образуют определенную иерархию [5], и их можно объединить в следующие группы: социальные, экономические, экологические и технологические критерии [6, 7].

Традиционно количество рассматриваемых створов было невелико, и их местоположение принималось из эвристических предположений.

Современные технологии позволяют анализировать множество различных вариантов створов на предмет соответствия выбранному списку критериев. Также можно рассматривать множество различных отметок нормального подпорного уровня (НПУ) в каждом створе. Наиболее подходящим вариантом для осуществления подобного анализа представляется использование геоинформационных систем (ГИС), позволяющих работать с большими объемами картографической пространственно-распределенной информации.

ГИС – это система сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных (географических) данных и связанной с ними атрибутивной информацией о необходимых объектах [8].

Применение методов многокритериального анализа совместно с ГИС является относительно новым и интенсивно развивающимся направлением [9–11].

Увеличивая число рассматриваемых критериев и уменьшая шаг разбиения реки на створы, можно повысить точность определения наилучшего местоположения для строительства ГЭС.

### ***Обзор литературы***

Обзор современных ГИС-инструментов для решения задач по нахождению гидроэнергетического потенциала представлен в работах [12, 13].

Использование ГИС для решения задач гидроэнергетики (в том числе задачи поиска перспективных створов малых ГЭС) было осуществлено в ряде стран, среди которых США [14], Шри-Ланка [15], Канада [16], Италия [17], Норвегия [18, 19] и др.

Наиболее показательным примером использования многокритериального анализа в среде ГИС для поиска перспективных створов ГЭС является исследование, проведенное в США. По результатам исследования были составлены отчеты [20, 21]. При выборе местоположения створов учитывались экологические критерии, критерии близости к дорогам, ЛЭП и другим объектам инфраструктуры. Однако было принято допущение, что для всех рассматриваемых створов малых ГЭС принимается единая деривационная компоновка, водохранилище не предусматривается.

В вышеуказанных работах [14–21] не было уделено должного внимания выбору отметки НПУ, а также не учитывалась стоимость работ по созданию водохранилищ. В рамках настоящей работы созданы и применены на практике ГИС-инструменты, позволяющие выбрать отметку НПУ рассматриваемых перспективных створов исходя из экологического и энергетического критерия; также при анализе была учтена приблизительная стоимость работ по созданию водохранилищ.

## *Цели и задачи исследования*

Целью исследования являлись создание и апробация методов, позволяющих осуществлять многокритериальный анализ в среде геоинформационных систем с целью поддержки принятия управленческих решений по выбору местоположения створов перспективных ГЭС на равнинных реках.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) определен список и последовательность учета критериев, оказывающих влияние на выбор местоположения створа перспективных ГЭС;
- 2) разработана методика оценки створов в соответствии с выбранными критериями;
- 3) созданы инструменты на базе ГИС, позволяющие осуществлять многокритериальный анализ;
- 4) проведена апробация разработанных методов на примере р. Сухоны.

## *Описание исследования*

### *Общий алгоритм решения многокритериальной задачи в среде ГИС*

Поиск перспективных створов для строительства ГЭС должен основываться на анализе ряда критериев, определяющих целесообразность постройки ГЭС в каждой из рассматриваемых точек реки. Для этого предлагается разбить с определенным шагом исследуемую реку на створы и оценить каждый створ в соответствии с выбранными критериями. Осуществление подобного многокритериального анализа в среде ГИС производится в следующей последовательности:

- определяется список критериев, с помощью которых будет осуществляться выбор наиболее перспективных створов;
- определяется последовательность применения выбранных критериев;
- разрабатывается методика поиска перспективных створов;
- осуществляется сбор исходных данных;
- проводится пространственный анализ, показывающий, в какой степени каждый из створов удовлетворяет каждому из предложенных критериев;
- выполняется комплексная оценка, с помощью которой выявляются наиболее перспективные створы для строительства гидроэлектростанции.

### *Область применения разработанных геоинформационных методов и принятые допущения*

Перед тем как перейти к рассмотрению критериев выбора и методики нахождения перспективных створов, необходимо упомянуть о некоторых ограничениях и допущениях, сделанных в настоящей работе.

1. Изложенные ниже геоинформационные методы, позволяющие определить наиболее выгодное местоположение ГЭС, применимы к равнинным рекам; подразумевается, что ГЭС имеет плотинную компоновку.

2. В рамках данной работы оказалось невозможным охватить весь перечень критериев, которые следует использовать для поиска оптимального местоположения створа ГЭС. Были рассмотрены экологические и экономические критерии, список которых представлен ниже.

### *Определение списка критериев отбора перспективных створов*

Окончательный список критериев, в соответствии с которыми в данной работе будут сравниваться створы, выглядит следующим образом:

- экологический критерий (запрет на затопление особо охраняемых природных территорий);
- энергетический критерий (возможность получения максимальной мощности ГЭС при стоимости затопляемых водохранилищем объектов, стремящейся к минимуму);
- близость к ЛЭП;
- близость к автомобильным дорогам;
- близость к железным дорогам;
- близость к карьерам строительных материалов (для сооружения плотины из местных материалов);
- близость к планируемым объектам капитального строительства.

### *Последовательность применения выбранных критериев*

Возможны две схемы применения критериев: последовательная и параллельная.

Изначально параллельно применяются критерии близости к объектам инфраструктуры.

Далее используется наиболее жесткий экологический критерий, с помощью которого исключаются из дальнейшего рассмотрения все варианты НПУ, при которых затопляются особо охраняемые природные территории.

После применения экологического критерия следует рассчитать оптимальную отметку НПУ для каждого створа исходя из энергетического критерия, т. е. найти для каждого створа такую высоту плотины, при которой выполняется условие

$$\left\{ \begin{array}{l} N \rightarrow \max \\ S \rightarrow \min \end{array} \right\}$$

где  $N$  – валовая мощность реки в рассматриваемом створе;  $S$  – приблизительная стоимость работ по созданию водохранилища.

### *Методика поиска перспективных створов*

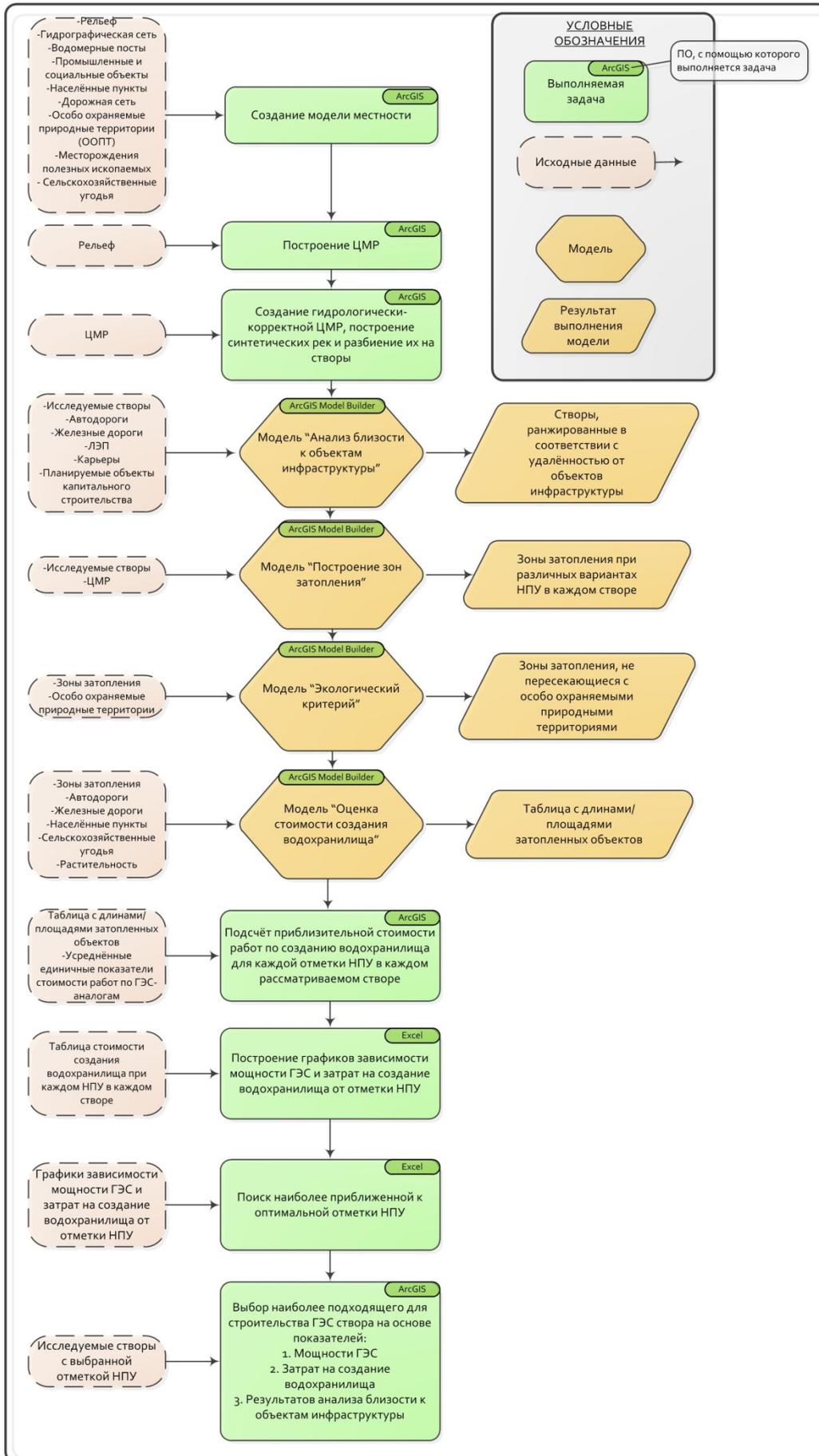
Реализация разработанной методики в среде ГИС осуществляется в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 2. Основное программное обеспечение, использованное в работе – ArcGIS 10.1. Далее рассмотрим каждый из блоков алгоритма. Для удобства восприятия излагаемого материала, некоторые пункты алгоритма будут сопровождаться поясняющими иллюстрациями на примере р. Сухоны.

#### **Создание модели местности**

При создании модели местности в ПО ArcGIS следует учитывать не только существующие объекты, но и планируемые к вводу в ближайшее время. Информация о таких объектах содержится в схемах территориального планирования субъектов РФ.

Исходными данными для создания модели местности в ПО ArcGIS 10.1 являются (в скобках указан источник информации):

- водомерные посты на исследуемой реке и средние многолетние расходы в их створах (эта информация доступна в источниках [22] и [23]);
- рельеф местности (электронные карты);
- речная сеть (электронные карты);
- автодороги (электронные карты и схемы территориального планирования);
- железные дороги (электронные карты и схемы территориального планирования);
- населенные пункты (электронные карты);
- сельскохозяйственные угодья;
- особо охраняемые природные территории (электронные карты и схемы территориального планирования);
- ЛЭП (электронные карты и схемы территориального планирования);
- планируемые объекты капитального строительства (схемы территориального планирования);
- карьеры строительных материалов (электронные карты);
- леса, кустарники (электронные карты).



**Рисунок 2. Алгоритм реализации методики поиска перспективных створов ГЭС в среде ГИС**  
 Иванов Т.С., Баденко Н.В., Олешко В.А. Геоинформационные методы поиска перспективных створов для строительства ГЭС

### Построение цифровой модели рельефа (ЦМР)

Для построения ЦМР был использован стандартный инструмент ArcGIS "Topo To Raster". Входными данными являются горизонтали, отметки высот и урезы воды. На основе этих данных была построена матрица высот, каждая ячейка которой содержит отметку местности в данной точке (см. рисунок 3).

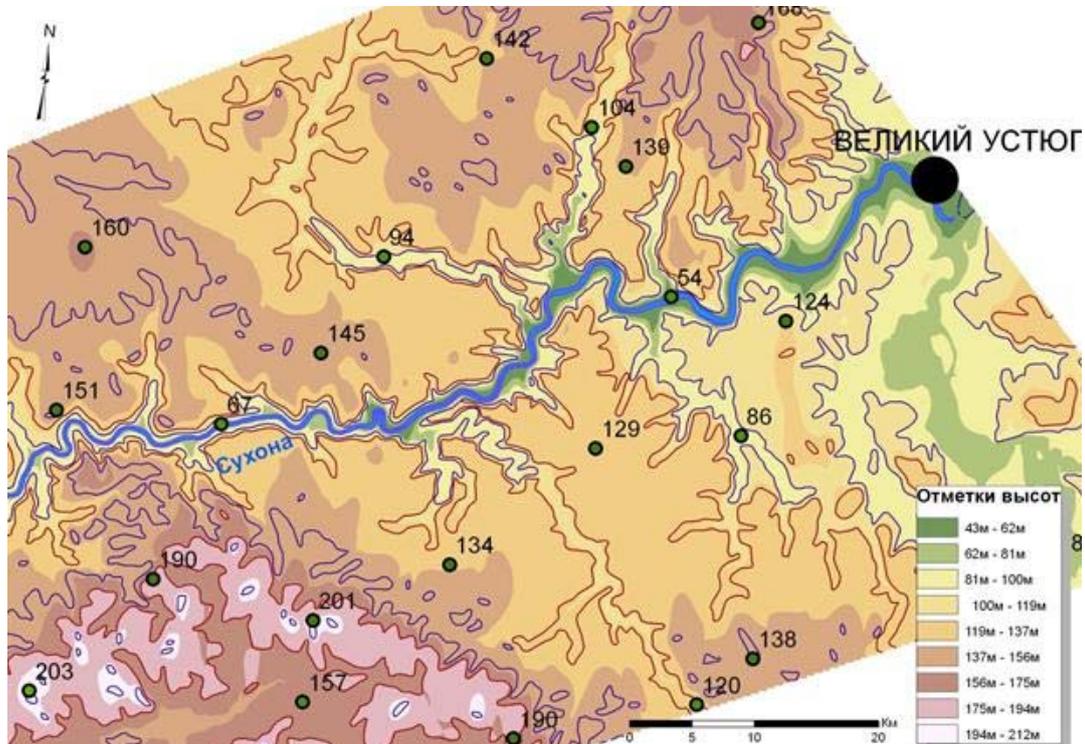


Рисунок 3. Фрагмент исходной ЦМР

### Создание гидрологически корректной ЦМР, построение синтетических рек и разбиение их на створы

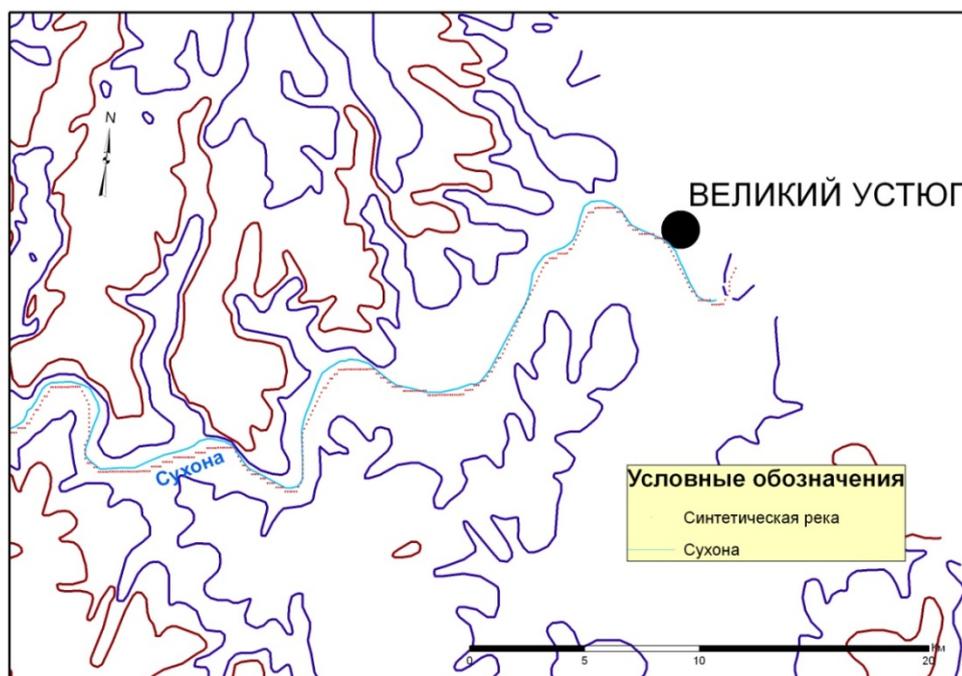


Рисунок 4. Сравнение реки, изображенной на карте, и синтетической реки

Дальнейший анализ потребует построения зоны затопления при различных вариантах НПУ в каждом створе. Для этого потребуется построение водосбора в каждом из створов.

Если разбить реку, являющуюся объектом слоя электронных карт, на точки (створы) и попытаться построить водосбор в каждой точке, то он будет построен некорректно. Это связано с тем, что река, показанная на электронных картах, чаще всего не проходит в местах с наименьшими отметками местности на всем своем протяжении. Кроме того, рельеф электронных карт обладает различными артефактами, например, бессточными областями или локальными повышениями рельефа.

Чтобы исключить подобные неточности, необходимо создать гидрологически корректную ЦМР и построить по этой модели синтетические реки. Эти реки будут незначительно отличаться от рек, содержащихся на электронных картах (см. рисунок 4). Однако синтетические реки будут проходить строго по наименьшим отметкам местности. Именно эти реки необходимо разбить на створы.

Для получения гидрологически корректной ЦМР и синтетических рек использовались инструменты из набора ArcGIS Spatial Analyst Tools -> Hydrology. Последовательность использования инструментов представлена на рисунке 5.

Полученные синтетические реки разбиваются на створы, шаг которых должен быть настолько мал, что в пределах этого расстояния можно пренебречь изменением значений критериев. Другими словами, принимается допущение, что изменение положения створа в пределах выбранного шага никак не отражается на характеристиках створа.



Рисунок 5. Алгоритм получения гидрологически корректной ЦМР и синтетических рек

### Анализ близости створов к объектам инфраструктуры

Анализ близости створов к объектам инфраструктуры осуществлялся с помощью разработанной в ArcGIS Model Builder модели. Модель «Анализ близости» находит ближайший к каждому из створов объект инфраструктуры и, в зависимости от расстояния до этого объекта, присваивает створу коэффициент близости  $K$ . Чем ближе к объекту инфраструктуры находится створ, тем большее значение коэффициента  $K$  присваивается створу.

В работе рассматривались следующие критерии близости:

- близость к ЛЭП;
- близость к автомобильным дорогам;
- близость к железным дорогам;
- близость к карьерам;
- близость к планируемым объектам капитального строительства.

Комплексная оценка створов заключается в нахождении коэффициента  $K_{сумм}$ , который является суммой всех коэффициентов  $K$ , умноженных на соответствующий весовой коэффициент. Расстояния, которые определяют значение коэффициента  $K$ , а также значения весовых коэффициентов должны определяться для каждой изучаемой реки индивидуально, на основе экспертной оценки.

Створы, имеющие наибольшее значение  $K_{сумм}$ , являются наиболее перспективными с точки зрения анализа близости.

Расположение объектов инфраструктуры на изучаемой территории показано на рисунке 6. Таблица атрибутов створов после выполнения анализа близости представлена на рисунке 7.

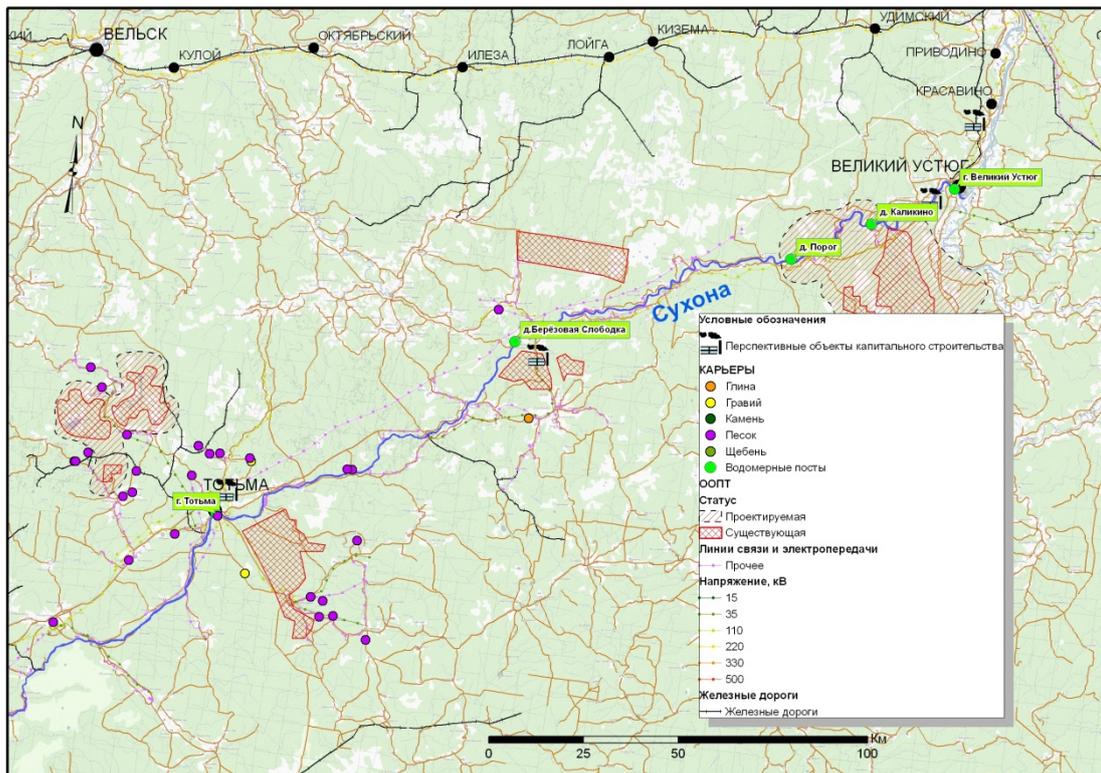


Рисунок 6. Расположение объектов инфраструктуры на изучаемой территории

ОБЪЕКТЫ	Близость_к_ЛЭП	К_ЛЭП	Близость_к_дорогам	К_дороги	Близость_к_карьерам	К_карьеры	Близость_к_железным	К_железные	Близость_к_объектам_кап_ст	К_объекты_кап_ст	К_сумм
361	537,800603	10	1179,393345	10	11227,185939	5	35343,074989	0	5241,039654	5	125
362	421,005746	10	1012,872674	10	11379,189335	5	35409,016497	0	5176,800887	5	125
363	460,614232	10	606,891541	10	9177,260569	8	34041,457383	0	6829,056029	5	131
364	514,075326	10	751,508439	10	9737,444252	8	34451,228829	0	6224,139252	5	131
365	525,926942	10	739,521467	10	9868,191214	8	34507,649558	0	6098,744925	5	131
366	554,744937	10	777,865513	10	10001,024608	5	34565,088504	0	5977,092942	5	125
367	641,499211	10	859,833084	10	10135,86239	5	34623,540848	0	5859,416434	5	125
368	964,068646	10	1344,650076	10	10622,467208	5	34836,02863	0	5482,474048	5	125
369	847,224957	10	1511,479955	8	10765,391519	5	34898,976293	0	5385,852536	5	117
370	645,469194	10	502,22867	10	9218,567284	8	33764,682676	0	6839,538181	5	131
371	915,756924	10	1131,08046	10	10413,155306	5	34495,471594	0	5685,188292	5	125
372	1043,268008	8	1251,26248	10	10549,929353	5	34556,266414	0	5472,999323	5	113
373	747,830448	10	485,341604	10	9323,139085	8	33552,098046	0	6785,784718	5	131
374	834,863836	10	476,937436	10	9431,664833	8	33339,603833	0	6738,79404	5	131
375	767,949933	10	460,044389	10	9609,797758	8	32850,325202	0	6746,705527	5	131
376	775,835273	10	485,595776	10	9737,001775	8	32637,98316	0	6722,519017	5	131
377	705,740199	10	673,14407	10	9938,891531	8	32148,793971	0	6781,95266	5	131
378	559,383986	10	630,974783	10	10365,82466	5	31659,636623	0	6876,089556	5	125
379	653,730971	10	572,116005	10	10305,781161	5	31447,52288	0	6890,396344	5	125
380	965,363023	10	503,018898	10	10557,887673	5	30958,469741	0	7032,737889	5	125
381	1164,339787	8	555,325945	10	10707,145499	5	30746,532155	0	7068,679305	5	113
382	1579,083632	8	663,067082	10	11012,757311	5	30322,984561	0	7160,352246	5	113
383	2029,30074	5	876,482935	10	11298,617708	5	29834,207232	2	7373,919549	5	103
384	2246,046486	5	1031,5879	10	11460,144547	5	29622,686924	2	7442,129696	5	103
385	2651,712942	5	1396,493921	10	11813,838414	5	29266,139178	2	7498,532391	5	103
386	3031,759912	5	1787,60678	8	12195,00117	5	28977,68913	2	7478,73323	5	95

Рисунок 7. Таблица атрибутов створов после выполнения анализа близости

### Построение зон затопления

Далее в каждом створе с помощью разработанной в Model Builder модели строится зона затопления, соответствующая отметкам НПУ, указанным оператором. Построение зон затопления осуществляется на основе ЦМР.

Иванов Т.С., Баденко Н.В., Олешко В.А. Геоинформационные методы поиска перспективных створов для строительства ГЭС

### Модель «Экологический критерий»

Получив зоны затопления, необходимо выяснить, какие из них удовлетворяют экологическому критерию, а какие нет. Зоны затопления, пересекающие границы особо охраняемых природных территорий, необходимо удалить из списка. Эта задача решается посредством запуска модели «Экологический критерий»

### Модель «Оценка стоимости создания водохранилища»

Следующим шагом необходимо определить отметку НПУ для каждого створа исходя из условия

$$\begin{cases} N \rightarrow \max \\ S \rightarrow \min \end{cases}$$

где  $N$  – валовая мощность реки в рассматриваемом створе;  $S$  – приблизительные затраты на создание водохранилища.

Для этого сначала получим оценку стоимости создания водохранилища для каждого варианта НПУ в каждом рассматриваемом створе с помощью модели в Model Builder.

Модель предназначена для вычисления длин/площадей следующих затопляемых при создании водохранилищ объектов:

- автомобильные дороги;
- железные дороги;
- населенные пункты;
- земли сельскохозяйственного назначения;
- леса и кустарники.

### Подсчет приблизительной стоимости работ по созданию водохранилища

На основе сметных расчетов для ГЭС-аналогов по усредненным единичным показателям стоимости работ определялись приблизительные затраты на создание водохранилища при каждой из отметок НПУ в каждом рассматриваемом створе.

### Построение графиков зависимости мощности ГЭС и затрат на создание водохранилища от отметки НПУ

В настоящем исследовании были проанализированы графики зависимости мощности ГЭС и затрат на создание водохранилища от отметки НПУ.

При увеличении отметки НПУ мощность ГЭС возрастает прямо пропорционально увеличивающемуся напору ГЭС:

$$N = gQH \quad (1)$$

где  $N$  – мощность ГЭС;  $Q$  – среднесуточный расход реки в створе ГЭС;  $H$  – напор ГЭС.

Затраты на создание водохранилища будут непрерывно нелинейно возрастать при увеличении высоты плотины.

Оптимальной отметкой НПУ будет та отметка, при которой мощность ГЭС  $N$  стремится к максимуму, а затраты на создание водохранилища  $S$  к минимуму.

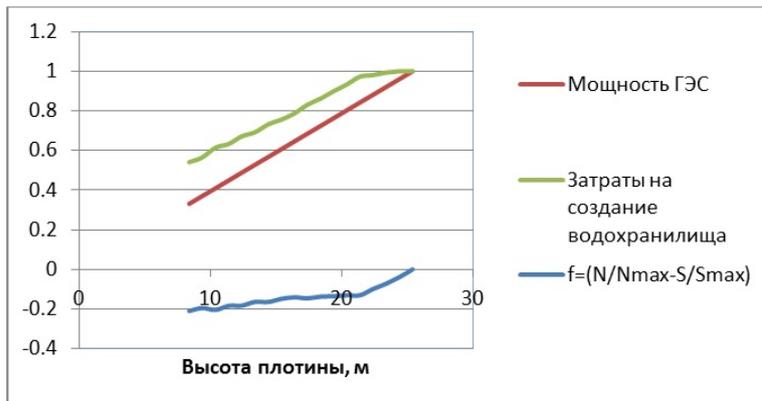
Для того чтобы отложить на графике вдоль оси ординат значения  $N$  и  $S$ , перейдем к относительным величинам  $N/N_{\max}$  и  $S/S_{\max}$ , где  $N_{\max}$  и  $S_{\max}$  – максимальные величины для каждого отдельного створа. Тогда условие для поиска оптимальной отметки НПУ в створе может быть записано в виде:

$$\left( \frac{N}{N_{\max}} - \frac{S}{S_{\max}} \right) \rightarrow \max \quad (2)$$

Возможны два варианта поведения функции  $f = (N / N_{\max} - S / S_{\max})$ .

1. При увеличении высоты плотины резко возрастают затраты на создание водохранилища, при дальнейшем повышении НПУ затраты изменяются медленнее.

В этом случае функция  $f = (N/N_{\max} - S/S_{\max})$  не имеет максимума (см. рисунок 8).

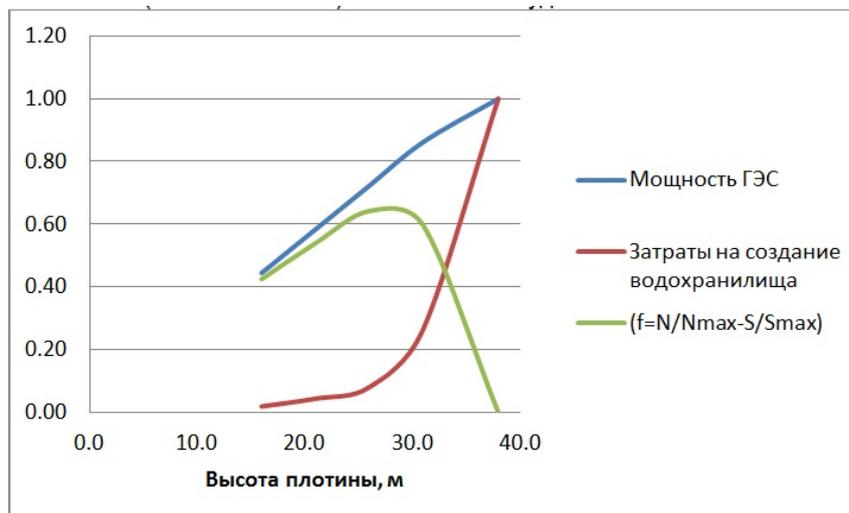


**Рисунок 8. График зависимости мощности ГЭС и затрат на создание водохранилища от отметки НПУ, первый вариант**

За оптимальную отметку НПУ в этом случае имеет смысл принять максимальную из рассматриваемых отметок, при которой не затопляются особо охраняемые природные территории.

2. При увеличении высоты плотины затраты на создание водохранилища возрастают сначала медленно, при дальнейшем повышении НПУ затраты изменяются быстрее. Этот случай может иметь место, когда долина реки расширяется, и количество затопляемых объектов резко возрастает. Именно такой случай рассматривался при исследовании р. Сухоны.

Здесь функция  $f = (N / N_{\max} - S / S_{\max})$  будет иметь максимум. В точке максимума скорость возрастания затрат на создание водохранилища превысит скорость возрастания мощности ГЭС (см. рисунок 9). Отметка НПУ (высоты плотины) в этой точке и будет являться оптимальной.

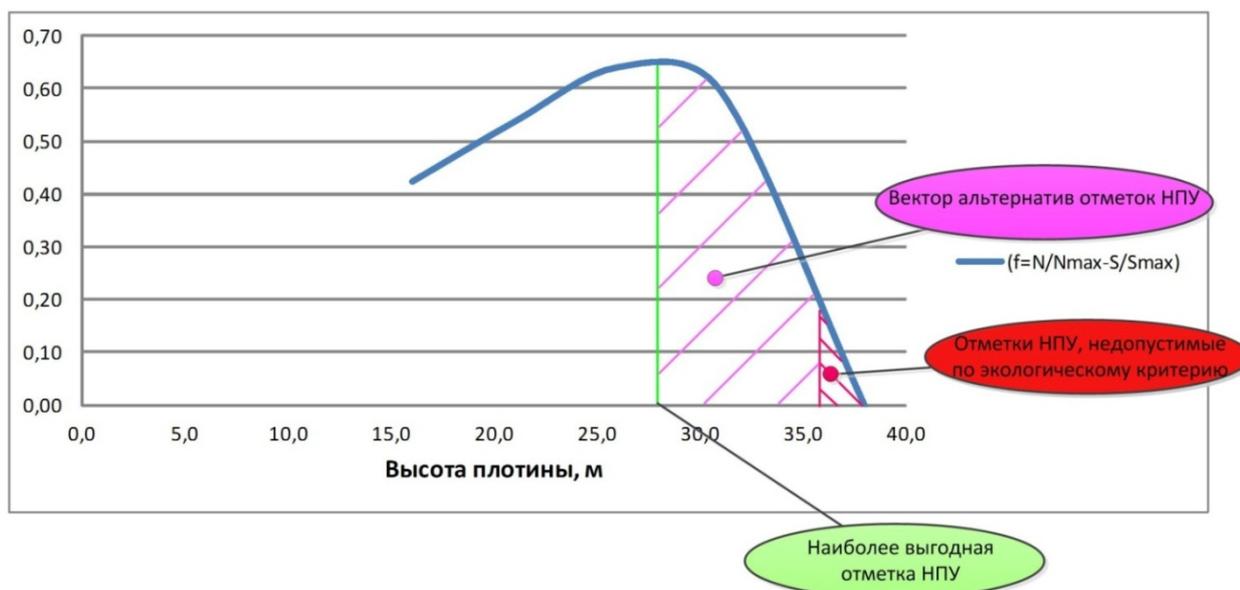


**Рисунок 9. График зависимости мощности ГЭС и затрат на создание водохранилища от отметки НПУ, второй вариант**

На основе полученных графиков в каждом створе определяется отметка НПУ и, соответственно, напор ГЭС.

Стоит отметить, что выбранная по графикам отметка НПУ будет наилучшей с точки зрения соотношения «мощность ГЭС – стоимость работ по созданию водохранилища». Однако в случае рассмотрения постройки ГЭС в энергодефицитном регионе возможен выбор более высокой отметки НПУ, не соответствующей максимуму графика. В более общем случае следует говорить о векторе альтернатив отметок НПУ, который показан на рисунке 10.

Иванов Т.С., Баденко Н.В., Олешко В.А. Геоинформационные методы поиска перспективных створов для строительства ГЭС



**Рисунок 10. Вектор альтернатив возможных отметок НПУ**

В этом случае выбор отметки НПУ будет зависеть от лица, принимающего решение.

### Выбор наиболее подходящего для строительства ГЭС створа

Выбор наиболее подходящего для строительства ГЭС створа предлагается осуществлять на основе трех полученных для каждого створа параметров.

#### 1. Мощность ГЭС (N).

Определяется по формуле (1): расход Q в створе определяется интерполяцией значений расходов ближайших водомерных постов выше и ниже по течению; напор H вычисляется исходя из выбранной в предыдущем пункте отметки НПУ.

#### 2. Стоимость работ по созданию водохранилища (S).

#### 3. Результаты анализа близости к объектам инфраструктуры ( $K_{сумм}$ ).

Для сравнения этих показателей необходимо перейти к относительным величинам  $N/N_{max}$ ;  $S/S_{max}$ ;  $K_{сумм}/K_{сумм,max}$ , где  $N_{max}$ ,  $S_{max}$  и  $K_{сумм,max}$  – максимальные величины среди всех исследуемых створов.

Комплексный показатель пригодности створа для строительства ГЭС можно будет найти как:

$$X = \frac{N}{N_{max}} * W_1 - \frac{S}{S_{max}} * W_2 + \frac{K_{сумм}}{K_{сумм,max}} * W_3, \quad (3)$$

где X – комплексный показатель пригодности створа для строительства ГЭС;  $W_1$  – весовой коэффициент, учитывающий влияние энергетического критерия;  $W_2$  – весовой коэффициент, учитывающий влияние стоимости создания водохранилища;  $W_3$  – весовой коэффициент, учитывающий влияние близости к объектам инфраструктуры.

Весовые коэффициенты должны назначаться в каждом случае индивидуально, с учетом таких факторов, как, например, энергетическая стратегия развития исследуемого региона (для регионов с дефицитом электроэнергии следует увеличить весовой коэффициент  $W_1$ ; для регионов с профицитом электроэнергии можно увеличить коэффициенты  $W_2$  или  $W_3$ ).

Створы, имеющие наибольшие показатели X, являются самыми перспективными для строительства ГЭС.

Стоит отметить, что окончательный выбор перспективного створа, а также его отметки НПУ зависят от лица, принимающего решение. Разработанная методика лишь позволяет получить информацию, необходимую для осуществления этого выбора.

Окончательный вид таблицы атрибутов створов представлен на рисунке 11.

Номер_створа	Отм.земли, м	Отметка НПУ, м	Q, м <sup>3</sup> /с	H, м	H, МВт	Затраты на вхдр S, тыс.руб.	K_сум	Kw	H/Imax	S/Smax	Kсумм_Kсумм_max	X
24	70,009	97	414	27	109,6562	466973,4	108	5	1	1	0,696774	7,090321
221	75,77746	98	401	22,2	87,33058	363989,3	110	6	0,796404	0,822294	0,709677	5,981598
303	78,14753	98	397	19,9	77,50194	323773,6	116	6	0,706772	0,693345	0,748387	5,846158
322	79,38364	98	395	18,6	72,07407	305540,5	125	6	0,657273	0,6543	0,806452	5,720588
355	81,6003	98	391	16,4	62,90564	173525,3	131	7	0,573662	0,371596	0,845161	6,41413
466	89,82793	99	368	9,2	33,21273	146372,5	136	7	0,302881	0,313449	0,877419	4,093817
518	96,09638	103	355	7	24,37785	446744,4	142	7	0,222312	0,956681	0,916129	0,1881
590	96,57451	103	342	6,4	21,47213	380744,4	128	6	0,195813	0,815345	0,825806	0,358827
729	98,47451	103	305	4,5	13,46422	265648,5	133	6	0,122786	0,568873	0,858065	0,957687
775	99,37994	105	293	5,6	16,09625	459924,5	155	8	0,146788	0,984905	1	-0,456643

Рисунок 11. Окончательный вид таблицы атрибутов створов

### *Теоретическая и практическая значимость работы*

Теоретическая значимость заключается в том, что в результате выполнения работы была создана методика поиска перспективных створов ГЭС в среде геоинформационных систем.

Практическая значимость заключается в том, что с помощью изложенной в работе методики и созданных ГИС-инструментов можно определить перспективные створы на любой равнинной реке, что может быть использовано в целях развития гидроэнергетики.

### *Выводы*

Разработанная методика поиска наилучшего местоположения створа для строительства ГЭС позволяет анализировать большое число створов и различных вариантов отметок НПУ на предмет соответствия экологическим и экономическим критериям. По сравнению с традиционным вариантом поиска створа, когда намечается несколько перспективных гидроузлов и рассматривается несколько вариантов отметок НПУ, изложенная выше методика имеет ряд преимуществ.

1. Число рассматриваемых створов может быть большим. Уменьшая шаг разбиения реки на створы, можно с большей точностью определять выгодные местоположения для строительства ГЭС.
2. Расчеты в значительной степени автоматизированы, что исключает влияние человеческого фактора.
3. Разработанная методика и ГИС-инструменты обладают универсальностью – изменяя исходные данные, можно выявлять положение перспективных створов на равнинных реках.

В результате выполнения работы были решены следующие задачи.

1. На основе анализа отечественной и зарубежной литературы проведён анализ существующих критериев, влияющих на выбор местоположения створов перспективных ГЭС. Предложен список определяющих критериев, учтённых в рамках данной работы;
2. Разработана методика поиска наилучшего местоположения створа для строительства ГЭС с учётом выбранных экологических, энергетических и экономических критериев. Методика реализована на основе использования геоинформационных систем;
3. Проведена апробация разработанной методики на примере р. Сухоны.

### **Литература**

1. Лабейш В.Г. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учеб. пособие / СЗТУ. СПб., 2003. 79 с.
2. Юркевич Б.Н. Гидроэнергетический потенциал России и перспективы его использования [Электронный документ] // Доклады членов отделения VIII съезду Петровской Академии Наук и Искусств. URL: <http://pani-pf.ru/Files/6.htm> (дата обращения: 15.04.2013).
3. Гришковец Е. Вечная энергия [Электронный ресурс] // Business Guide Гидроэнергетика. Приложение, №40 (95), 30.08.2011. URL: <http://www.kommersant.ru/doc/1756419> (дата обращения: 15.04.2013).

4. Программа развития малой гидроэнергетики РусГидро [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rushydro.ru/industry/res/tidal/> (дата обращения: 15.04.2013).
5. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети. М.: Либроком, 2011. 357 с.
6. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Зотов К.В. [и др.] Управление природно-техногенными комплексами: Введение в экоинформатику: Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. 252 с.
7. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Иванов Т.С. Методические аспекты геоинформационного обеспечения инвестиционных проектов по развитию гидроэнергетики России // Гидротехническое строительство. 2007. №5. С. 7–10.
8. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Осипов Г.К. Оценка природно-ресурсного потенциала территории с использованием ГИС-технологий // Региональная экология. 1998. №1. С. 17–23.
9. Larentis D.G., Collischonn W., Olivera F., Tucci C. Gis-based procedures for hydropower potential spotting // Energy. 2010. Vol. 35(10). Pp. 4237–4243.
10. Якушев В.П., Куртнер Д.А., Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Кудашев Е.В., Кудлип В. Методология многокритериальной оценки земельных участков на основе алгоритмов теории нечетких множеств, интегрированных в геоинформационные системы // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2000. №4. С. 42–43.
11. Арефьев Н.В., Баденко В.Л., Латышев Н.К. Геоэкологические подходы к разработке информационно-аналитических систем для гидромелиоративного строительства и природообустройства // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. №4. С. 205–211.
12. Punys P., Dumbrasukas A., Kvaraciejus A., Vyciene G. Tools for small hydropower plant resource planning and development: A review of technology and applications // Energies. 2011. No.4(9). Pp. 1258–1277.
13. Malczewski J. GIS and multicriteria decision analysis. New York: Wiley&Sons, 1999. 392 p.
14. Virtual Hydropower Prospector (VHP) [Электронный ресурс]. URL: <http://hydropower.inel.gov/prospector/index.shtml> (дата обращения: 18.04.2013).
15. Deheragoda C., Gunathilaka J., Jayantha H. Potential of GIS for Promotion of Renewable Energy Power Generation in Sri Lanka with Special Reference to Mini Hydro Projects [Электронный ресурс]. URL: <http://mapasia.org/2009/proceeding/utility/index.html> (дата обращения: 18.04.2013).
16. Monk R., Joyce S., Homenuke M. Rapid Hydropower Assessment Model: Identify Hydroelectric Sites Using Geographic Information Systems // Proceedings of the Small Hydro Conference 2009, Vancouver, Canada, April 2009. Pp. 28–29.
17. Davitti A. [et al.] Evaluation of the remaining hydro potential in Italy // International Journal on Hydropower and Dams. 2009. No.5. Pp. 56–59.
18. Voksø A. Using GIS to calculate potential for small hydro power plants in Norway // Proceedings of the XXV Nordic Hydrological Conference, Nordic Association for Hydrology, Reykjavik, Iceland, August 2008. Pp. 477–479.
19. Jensen T. Estimation of the Potential for Small Power Plants in Norway // Report No. 19; Norwegian Water Resources and Energy Directorateю Oslo, Norway, 2004. P. 29.
20. Hall D.G. [et al.] Water Energy Resources of the United States with Emphasis on Low Head/Low Power Resources [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://hydropower.inel.gov/resourceassessment/pdfs/03-11111.pdf> (дата обращения: 18.04.2013).
21. Hall D.G. [et al.] Feasibility Assessment of the Water Energy Resources of the United States for New Low Power and Small Hydro Classes of Hydroelectric Plants [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://hydropower.inel.gov/resourceassessment/pdfs/main\\_report\\_appendix\\_a\\_final.pdf](http://hydropower.inel.gov/resourceassessment/pdfs/main_report_appendix_a_final.pdf) (дата обращения: 18.04.2013).
22. Сведения о водомерных постах России по данным ЮНЕСКО [Электронный ресурс]. URL: <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/part%274/FORMER%20USSR/RUSSIA/list2.html> (дата обращения: 18.04.2013).
23. ГИС Центра Регистра и Кадастра [Электронный ресурс]. URL: <http://gis.waterinfo.ru/> (дата обращения: 18.04.2013).

*\*Тимофей Сергеевич Иванов, Санкт-Петербург, Россия  
Тел. раб.: +7(812)493-93-17; эл. почта: ivanovts@vniig.ru*

© Иванов Т.С., Баденко Н.В., Олешко В.А., 2013

Иванов Т.С., Баденко Н.В., Олешко В.А. Геоинформационные методы поиска перспективных створов для строительства ГЭС

doi: 10.5862/MCE.39.8

## Geoinformation methods of identifying locations for prospective HPP

**T.S. Ivanov;**  
**N.V. Badenko,**

JSC Vedeneyev VNIIG, Saint-Petersburg, Russia;

**V.A. Oleshko,**

Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia

+7(961)804-50-77; e-mail: ivanovtim@gmail.com

### Key words

geographic information systems (GIS); multi-criteria analysis; hydropower plant (HPP); prospective HPP; decision-making

### Abstract

Currently large-scale studies of water-power potential of minor and mean rivers are being conducted to identify location of prospective hydropower plants and estimate their manufacture and economic efficiency. Because of tight schedule, large study area and large number of criteria involved in choosing prospective hydropower plants, it is necessary to use modern methods and technologies to solve the problem.

This paper reviews the methodology that allows performing multi-criteria analysis to find locations on plain rivers suitable for hydropower development. All estimations were performed using geographic information systems (GIS).

Traditional way to find location for prospective hydropower plants consists in comparing several variants of location for hydropower development and several marks of normal pond level. Unlike traditional method, developed methodology and GIS-based tools allow analyzing large number of locations and considerably automating calculations.

### References

1. Labeys V.G. *Netraditsionnyye i vozobnovlyayemyye istochniki energii: Ucheb. Posobiye* [Alternative and renewable energy sources: tutorial]. Saint-Petersburg, 2003. 79 p. (rus)
2. Yurkevich B.N. *Doklady chlenov otdeleniya VIII syezdu Petrovskoy Akademii Nauk I Iskusstv* [Proceedings of members of VIII congress of Petrovskaya Academy of Sciences and Art]. [Online source] URL: <http://pani-pf.ru/Files/6.htm> (accessed: April 15, 2013). (rus)
3. Grishkovets Ye. *Business Guide Gidroenergetika. Prilozheniye* [Business Guide Hydraulic Engineering. Tabloid]. No.40(95). 30.08.2011. [Online source]. URL: <http://www.kommersant.ru/doc/1756419> (accessed: April 15, 2013). (rus)
4. *Programma razvitiya maloy gidroenergetiki RusGidro* [Hydraulic engineering development program of RusGidro]. [Online source]. URL: <http://www.rushydro.ru/industry/res/tidal/> (accessed April 15, 2013). (rus)
5. Saati T.L. *Prinyatiye resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh. Analiticheskiye seti* [Decision-making in dependency and feedback coupling. Analytical nets]. Moscow: Librokom, 2011. 357 p. (rus)
6. Arefyev N.V., Badenko V.L., Zotov K.V. [et al.] *Upravleniye prirodno-tekhnogennymi kompleksami: Vvedeniye v ekoinformatiku: Uchebnoye posobiye* [Natural anthropogenic complex management. Introduction to ecoinformatics: tutorial]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGTU, 2000. 252 p. (rus)
7. Arefyev N.V., Badenko V.L., Ivanov T.S. *Power Technology and Engineering*. 2007. No.5. Pp. 7–10 (rus).
8. Arefyev N.V., Badenko V.L., Osipov G.K. *Regional Ecology*. 1998. No.1. Pp. 17–23. (rus)
9. Larentis D.G., Collischonn W., Olivera F., Tucci C. Gis-based procedures for hydropower potential spotting. *Energy*. 2010. Vol. 35(10). Pp. 4237–4243.
10. Yakushev V.P., Kurtener D.A., Arefyev N.V., Badenko V.L., Kudashev Ye.V., Kudlip V. *Doklady Rossiyskoy akademii selskokhozyaystvennykh nauk* [Proceedings of Russian academy of agricultural science]. 2000. No.4. Pp. 42–43. (rus)

11. Arefyev N.V., Badenko V.L., Latyshev N.K. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2010. No.4. Pp. 205–211. (rus)
12. Punys P., Dumbrasukas A., Kvaraciejus A., Vyciene G. Tools for small hydropower plant resource planning and development: A review of technology and applications. *Energies*. 2011. No.4(9). Pp. 1258– 1277.
13. Malczewski J. *GIS and multicriteria decision analysis*. New York: Wiley&Sons, 1999. 392 p.
14. *Virtual Hydropower Prospector (VHP)* [Online source]. URL: <http://hydropower.inel.gov/prospector/index.shtml> (accessed: April 18, 2013).
15. Deheragoda C., Gunathilaka J., Jayantha H. *Potential of GIS for Promotion of Renewable Energy Power Generation in Sri Lanka with Special Reference to Mini Hydro Projects* [Online source]. URL: <http://mapasia.org/2009/proceeding/utility/index.html> (accessed: April 18, 2013).
16. Monk R., Joyce S., Homenuke M. Rapid Hydropower Assessment Model: Identify Hydroelectric Sites Using Geographic Information Systems. *Proceedings of the Small Hydro Conference 2009*. Vancouver, Canada, April 2009. Pp. 28–29.
17. Davitti A. [et al.] Evaluation of the remaining hydro potential in Italy. *International Journal on Hydropower and Dams*. 2009. No.5. Pp. 56–59.
18. Voksø A. Using GIS to calculate potential for small hydro power plants in Norway. *Proceedings of the XXV Nordic Hydrological Conference, Nordic Association for Hydrology*. Reykjavik, Iceland, August 2008. Pp. 477–479.
19. Jensen T. *Estimation of the Potential for Small Power Plants in Norway. Report No. 19*. Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Oslo, Norway, 2004. P. 29.
20. Hall D.G. [et al.] *Water Energy Resources of the United States with Emphasis on Low Head/Low Power Resources* [Online source]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://hydropower.inel.gov/resourceassessment/pdfs/03-11111.pdf> (accssed: 18.04.2013).
21. Hall D.G. [et al.] *Feasibility Assessment of the Water Energy Resources of the United States for New Low Power and Small Hydro Classes of Hydroelectric Plants* [Online source]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://hydropower.inel.gov/resourceassessment/pdfs/main\\_report\\_appendix\\_a\\_final.pdf](http://hydropower.inel.gov/resourceassessment/pdfs/main_report_appendix_a_final.pdf) (accessed April 18, 2013).
22. *Svedeniya o vodomernykh postakh Rossii po dannym YuNESKO* [Information on Russian hydrometric stations, according to UNESCO]. [Online source]. URL: <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/part%274/FORMER%20USSR/RUSSIA/list2.html> (accessed: April 18, 2013).
23. *GIS Tsentra Registra i Kadastra* [GIS of cadaster and register center]. [Online source]. URL: <http://gis.waterinfo.ru/> (accessed: April 18, 2013).

**Full text of this article in English: pp. 70–82**