

П.Ю. Литинский¹

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ГИС ВОДОСБОРОВ В ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЕ «ОЗЁРА КАРЕЛИИ»

АННОТАЦИЯ

Экспертная система «Озёра Карелии» создаётся для классификации озёр, определения их трофического статуса и оценки водных и биологических ресурсов. Озёра в гумидной зоне в совокупности со своими водосборами представляют собой единую экосистему. Суммарное поступление терригенных органических веществ в озёра определяется пространственной структурой биогеоценозов в пределах водосбора. Однако до последнего времени такие данные в экспертной системе практически отсутствовали. Для прогнозирования изменений химического состава речного стока в условиях изменения климата необходимо дополнение экспертной системы геоинформационным блоком, интегрирующим данные о структуре и динамике наземных экосистем водосборов озёр, рельефе и гидрографической сети. Структура и динамика экосистем водосборов выявляется по снимкам Landsat с использованием оригинальной методики моделирования спектрального пространства. Это обеспечивает критически важное в данном случае выделение различных автоморфных и гидроморфных местообитаний, а также разных типов и стадий антропогенных нарушений экосистем. Для картографирования гидрографической сети и границ водосборов используется цифровая модель высот с пространственным разрешением 3". В статье приводится подробное описание методики создания основных слоев ГИС с использованием свободного программного обеспечения. Важность ГИС водосборов для экспертной системы исключительно высока, поскольку её принцип – прогнозирование неизвестных характеристик озёр, исходя из известных. Вследствие огромного количества озёр натурные данные имеются лишь для ограниченного количества объектов, тогда как ГИС содержит информацию для всех водосборов всех озёр Карелии по целому ряду физико-географических и экологических показателей: структура и динамика лесных и болотных экосистем, определяющих продукцию органических веществ; антропогенные нарушения; ландшафтный контекст (рельеф, тип четвертичных отложений).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоматическое моделирование, таёжные экосистемы, озёра, водосборы, рельеф

Peter Yu. Litinsky²

THE METHODS OF CREATING OF THE GIS OF CATCHMENTS IN THE EXPERT SYSTEM “LAKES OF KARELIA”

ABSTRACT

An expert system is created for the classification of lakes, the assessment their characteristics, trophic status and biological resources. Lakes in the humid zone, together with their watersheds, constitute a single ecosystem. The total influx of terrigenous organic matter into lakes is

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, просп. А. Невского, дом 50, 185030, Петрозаводск, Россия, *e-mail*: litinsky@sampo.ru

² Northern Water Problems Institute of KarRC RAS, A. Nevsky ave, 50, 185030, Petrozavodsk, Russia, *e-mail*: litinsky@sampo.ru

determined by the spatial structure of biogeocenoses within the catchment area. However, until recently, such data in the expert system were practically absent. For a prediction of changes in the chemical composition of river runoff in a condition of changing climate, it is necessary to supplement the expert system with a geoinformation segment integrating data on the structure and dynamics of terrestrial ecosystems of lakes' catchments, topography and hydrographic network. The structure and dynamics of watershed ecosystems are mapped from Landsat images using the original spectral space modeling technique. This provides a critically important in this case the allocation of various automorphic and hydromorphic habitats, as well as different types and stages of anthropogenic disturbances of ecosystems. A digital elevation model with a spatial resolution of 3" is used to model the hydrographic network and catchments' borders. The article provides a detailed description of the methods for creating basic GIS layers using free software. The importance of GIS watersheds for the expert system is extremely high, since its principle is the prediction of unknown characteristics of lakes based on known ones. Due to the huge number of lakes, field data are available only for a limited number of objects, while the GIS contains information for all the catchments of all lakes in Karelia on a variety of physiographic and ecological parameters: the structure and dynamics of forest and marsh ecosystems determining the production of organic matter; anthropogenic disturbances; landscape context (relief, type of quaternary deposits).

KEYWORDS: geomatic modeling, boreal ecosystems, lakes, catchments, relief

ВВЕДЕНИЕ

Экспертная система «Озёра Карелии» создаётся для классификации озёр, определения их трофического статуса и оценки водных и биологических ресурсов в условиях недостатка или отсутствия данных. Информационная основа системы включает ГИС озёр Карелии и базу данных по морфометрическим, гидрофизическим, гидрохимическим и гидробиологическим характеристикам нескольких сотен озёр. Экспертная система разрабатывается на основе методов искусственного интеллекта [Меншуткин и др., 2009].

До последнего времени практически единственной информацией о водосборе озёр, включённых в экспертную систему, была его площадь. Однако озёра в совокупности со своими водосборами представляют собой сложную природную систему. Связь водоёмов с их водосборами особенно высока в гумидной зоне – содержание аллохтонного органического вещества (ОВ) в большинстве озёр выше, чем автохтонного, выше и вариабельность его концентрации в различных водоёмах [Зобкова и др., 2017].

Основной источник образования аллохтонного ОВ – болота и лесная подстилка [Hongve et al., 2000; Lofts et al., 2001]. Образование, деструкция и транспорт ОВ зависят от типов растительности, почвы и гидротермических условий. Все эти факторы определяются типом биogeоценоза, и, таким образом, суммарный экспорт ОВ в озеро – функция пространственной структуры типов экосистем в пределах водосбора. Имеет также значение рельеф местности – при высоком среднем уклоне дождевые воды поступают в водоёмы с большей скоростью, насыщаясь при этом меньшими количествами ОВ. Экосистемы водосбора влияют и на приходную часть водного баланса – испарение поступающей с осадками воды зависит от типа и состояния растительного покрова, который, в свою очередь, меняется вследствие природных и антропогенных факторов.

Влияние водосборов ещё более усиливается в последние десятилетия в связи с потеплением климата и увеличением количества осадков озера [Калинкина и др., 2018]. Для более точного прогнозирования изменений химического состава речного стока необходимо понимание механизма его формирования на водосборной территории, для чего, в свою очередь, нужна информация о рельефе местности, пространственной структуре и динамике экосистем. Для решения этой задачи были начаты работы по созданию ГИС водосборов озёр Карелии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Структура и динамика экосистем водосборов выявляется на основе глобального покрытия снимков Landsat (<ftp://ftp.glcf.umd.edu/glcf/Landsat>). Обработка снимков производится по оригинальной методике моделирования спектрального пространства [Литинский, 2018 а; б; Litinsky, 2018]. Принципиальное её отличие от традиционной управляемой классификации в том, что результат определяется объективным, измеряемым биофизическим параметром – положением экосистемы в спектральном пространстве снимка. Это обеспечивает критически важное в данном случае достоверное выделение различных автоморфных и гидроморфных местообитаний, а также разных типов и стадий антропогенных нарушений экосистем. Методика создания модели экосистем подробно изложена в указанных публикациях, находящихся в открытом доступе, и поэтому здесь не приводится.

Для моделирования рельефа и гидрографической сети используется цифровая модель высот (DEM) с пространственным разрешением 3 угловых секунды и 1 м по высоте (<http://viewfinderpanoramas.org>). Она не лишена отдельных ошибок, но тем не менее на её основе впервые стал возможен относительно точный расчёт линий аккумуляции стока, контуров водосборов, а также различных геоморфометрических характеристик. Все операции могут выполняться с использованием ГИС-пакетов открытого доступа GDAL, GRASS, SAGA. Далее приводится ряд bat-файлов, содержащих команды, необходимые для создания слоёв ГИС.

DEM формируется из отдельных фрагментов размером 1×1 градус (*.hgt*), затем рассчитываются необходимые для получения контуров водосборов растры аккумуляции (*acc*) и направлений (*dr*) стока:

```
gdal_merge -o dem.tif n60e027.hgt . . . n65e037.hgt
r.in.gdal i=dem.tif ou=dem -o --o
g.region rast=dem
r.watershed elev=dem acc=acc drainage=dr -s --o
```

При анализе раstra *acc* в некоторых участках территории обнаруживаются ошибки, искажающие реальную структуру водотоков. Для их коррекции создается файл *hcorr.shp* с полигонами, описывающими виртуальные «плотины и каналы», которым и обрабатывается файл DEM:

```
gdal_rasterize hcorr.shp dem.tif -a H
```

После этого необходимо заново создать растры *acc* и *dr* (рисунок 1).

Для автоматического получения контуров водосборов озер и расчета площадей различных категорий экосистем в границах водосборов необходимо провести ряд операций. Сначала по модели высот *dem.tif* выделяются области нулевых уклонов (водные зеркала озер) и векторизуются в файл *s0.shp*:

```
gdaldem_slope dem.tif slope.tif -p -s 1.0
gdal_calc -A slope.tif --outfile=s0.tif --calc="A==0" --NoDataValue=0
gdal_polygonize s0.tif -f "ESRI Shapefile" s0.shp
```

В слое *s0.shp* выбираются полигоны, внутри которых находятся точки с координатами центроидов озёр экспертной системы. Идентификатору полигона присваивается значение кадастрового номера озера, остальные полигоны удаляются. Затем вокруг полигонов создаются буферные зоны шириной 0.001° (приблизительно один пиксел DEM), определяются точки пересечения буферной линии с линиями аккумуляции стока. Их координаты, а также значения *acc* и идентификаторы озёр записываются в файл *out.txt*:

```
saga_cmd shapes_tools 18 -SHAPES=s0.shp -BUFFER=bu -DIST_FIELD_DEFAULT=0.001
ogr2ogr -nlt LINESTRING lbuf.shp bu.shp
v.in.ogr i=lbuf.shp ou=lbuf -o --o
v.to.rast input=lbuf output=wpoints use=attr attribute_column=ID --o
r.mapcalc expression="calc = if(wpoints>0 && acc>10000,wpoints,0)" --o
r.null map=calc setnull=0
r.to.vect i=calc o=calc type=point -v --o
r.what m=acc,calc p=calc s=space o=out.txt --o
```

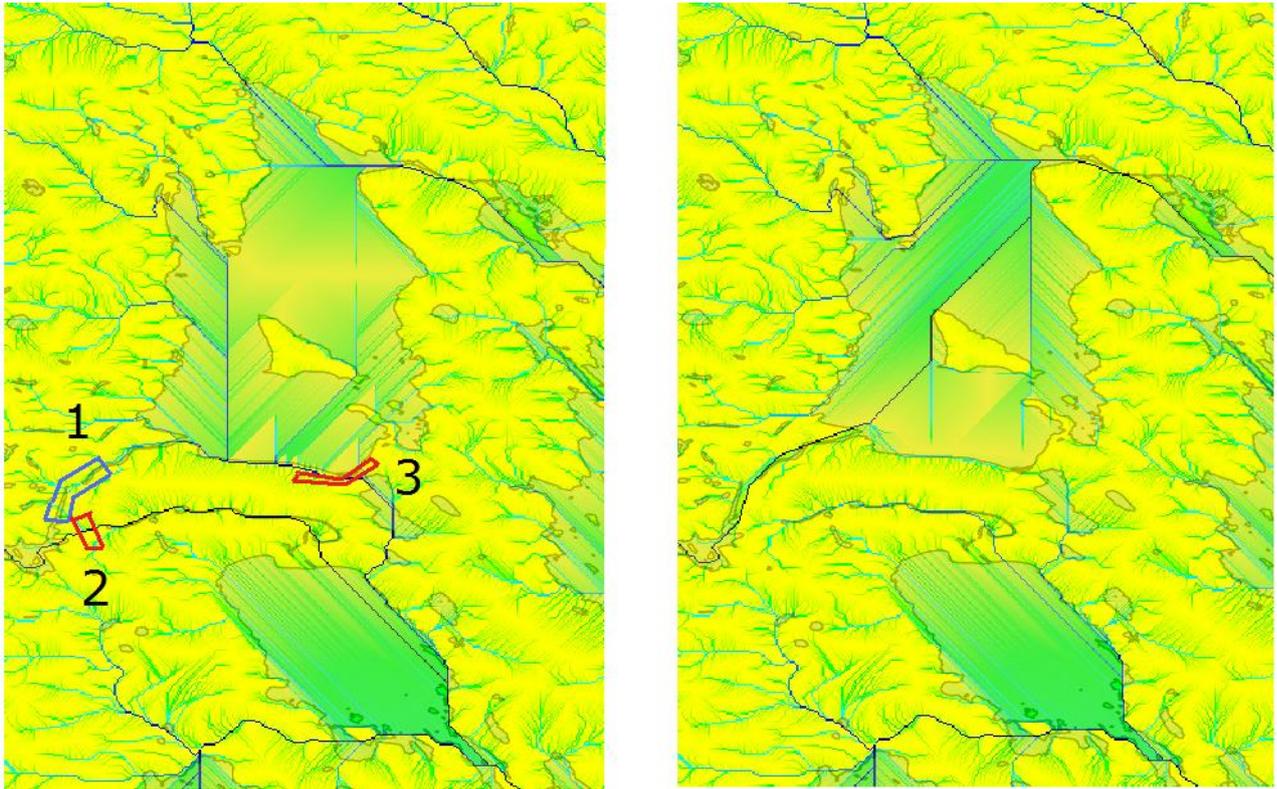


Рис. 1. Слева – исходный растр аккумуляции стока, справа – после корректировки DEM
(1 – канал, 2, 3 – плотина, дамба)

Fig. 1. Left is the initial flow accumulation raster, right – after correction
(1 – channel, 2, 3 – dam)

Из файла *out.txt* выбираются строки с наибольшим значением *acc* (наибольшей площадью водосбора) для каждого озера, используя, например Си-программу вида:

```
f=fopen("out.txt","r"); g=fopen("wp.txt","w");
while(fscanf(f,"%lf %lf %d %d",&x,&y,&a,&n)!=EOF){ nk[n]=1; }
for(i=0;i<9999;i++) if(nk[i]) nnk[j++]=i;
for(i=0;i<j;i++) { rewind(f); nn=0;
while(fscanf(f,"%lf %lf %d %d",&x,&y,&a,&n)!=EOF){
if(nnk[i]==n) if(a>nn) { nn=a; xx=x; yy=y; }
} fprintf(o,"%f %f %d\n",xx,yy,nnk[i]); }
```

По координатам из файла *wp.txt* получаем сначала растр, затем вектор водосбора (рис. 2), экспортируем его в *shp*-файл, трансформируем в проекцию растра модели экосистем

(*em.tif*) – utm36/wgs84. Из растра вырезаются ограниченные водосбором фрагменты, рассчитываются их гистограммы, которые собираются в файл *hist.txt*:

```
for /f "tokens=1,2,3" %%i in (wp.txt) do (  
  r.water.outlet input=dr output=ou coordinates=%%i,%%j --o  
  r.to.vect input=ou output=ou type=area -s -v --o  
  v.out.ogr input=ou f=ESRI_Shapefile ou=w%%k.shp --o  
  ogr2ogr w%%k.shp b%%k.shp -s_srs EPSG:4326 -t_srs EPSG:32636  
  gdalwarp -q -cutline b%%k.shp -crop_to_cutline -dstnodata 0 em.tif _%%k.tif  
  )  
findstr "<HistCounts>" *.xml >hist.txt
```

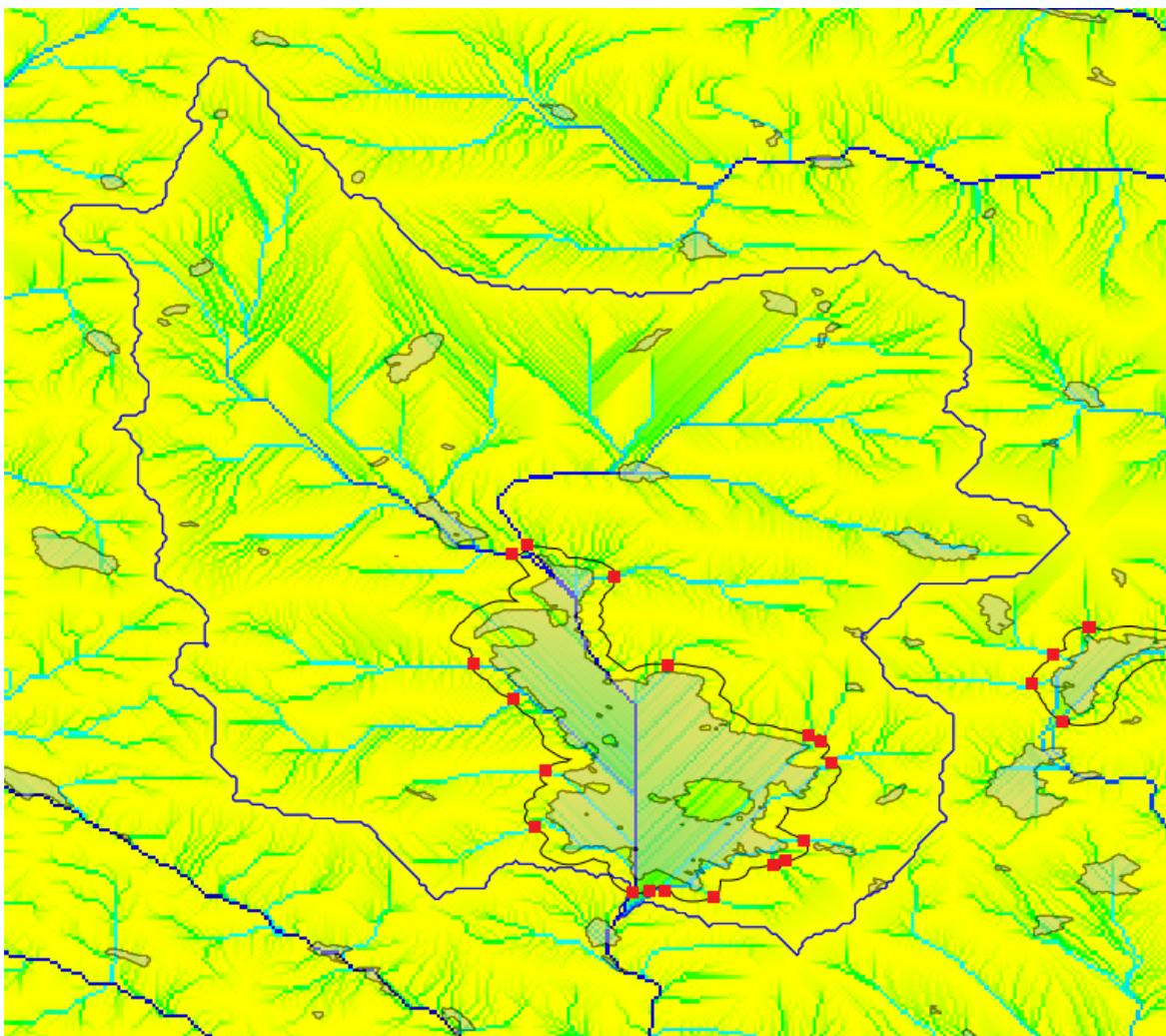


Рис. 2. Схема формирования водосборов озёр.
Красные точки – пересечения буферной зоны береговой линии
и линий аккумуляции стока

Fig. 2. The scheme of creating catchments.
Red points are the intersections of the buffer zone of the coastline
and runoff accumulation lines

По гистограммам определяются площади каждой категории экосистем в пределах каждого водосбора.

Векторный слой гидрографической сети *riv.shp* образуется путём обработки растра аккумуляции стока:

```
r.mapcalc expression="riv=int(if(acc>5000,1))" --o
r.thin input=riv output=rivt --o
r.to.vect i=rivt ou=riv type=line -v -s --o
v.out.ogr input=a type=line ou=riv.shp -c -o
```

Полигоны озёр получены векторизацией соответствующей категории растра модели экосистем, который имеет несколько большее пространственное разрешение (30 м) и, соответственно, более точные границы береговой линии.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время ГИС охватывает территорию водосборов Онежского озера, большей части водосбора Ладожского озера и карельской части водосбора Белого моря (рис. 3).

В качестве примера рассмотрим бассейн реки Каменная, представляющий собой озерно-речную систему от Беломорско-Балтийского водораздела к Белому морю, до впадения в р. Чирка-Кемь (рис. 4). Фрагмент включает водосборы четырех озёр: Каменное, Ловозеро, Кимасозеро, Нюк.

Детальная визуализация рельефа и гидрографической сети способствует интуитивному пониманию процессов формирования стока. На верхней части рисунка показаны концентрации в воде озёр железа (основного маркера аллохтонного ОВ); данные приводятся по справочнику «Озёра Карелии» [2013]. Минимальное содержание Fe (0.01 мг/л) – в озере Каменном, с небольшим по размеру и сильно пересечённым водосбором, на котором преобладают сухие моренные, песчаные и скальные местообитания. Водосборы двух следующих ниже по течению озёр больше по площади, степень их заболоченности выше, а доля сухих местообитаний меньше, что приводит к резкому увеличению концентрации железа (0.14 и 0.27 соответственно).

Однако столь простые закономерности отмечаются далеко не всегда. Так, в четвёртом озере (Нюк) концентрация Fe снижается до 0.15 мг/л, несмотря на максимальную общую площадь его водосбора. Возможно, это связано с влиянием его притоков с относительно небольшой площадью их локальных водосборов и с большим объёмом воды в самом озере. Кроме того, одной точки взятия проб для столь крупного озера сложной формы явно недостаточно. Всё это свидетельствует о недостаточной изученности механизма формирования терригенного ОВ в озерно-речных системах. Только детальное изучение всей пространственной структуры поверхностного стока с использованием данных ГИС водосборов может обеспечить понимание принципов функционирования сложной экосистемы «водосбор-озеро».

Водосборы различаются также по степени антропогенной нарушенности; на данной территории это прежде всего рубки леса (рис. 5). Вырубки приводят к снижению испарения с территории на 50–60 % [Крестовский, 1986] и, соответственно, к увеличению стока до 90 % [Bosch, Hewlett, 1982]. Затем, по мере возобновления леса, сток уменьшается до определённого минимума в период наибольшей транспирации в молодом древостое и далее несколько увеличивается к возрасту спелости [Карпечко, 2016]. Таким образом, в течение продолжительного времени на водосборе меняются условия формирования элементов водного баланса и химического состава стекающей воды [Карпечко, Бондарик, 2010; Ide et al., 2013]. Использование ГИС позволяет интегрировать пространственные данные с результатами натурных исследований водоёмов и водосборов с целью выявления информационных

связей и затем – функциональных зависимостей между характеристиками наземных и водных экосистем.

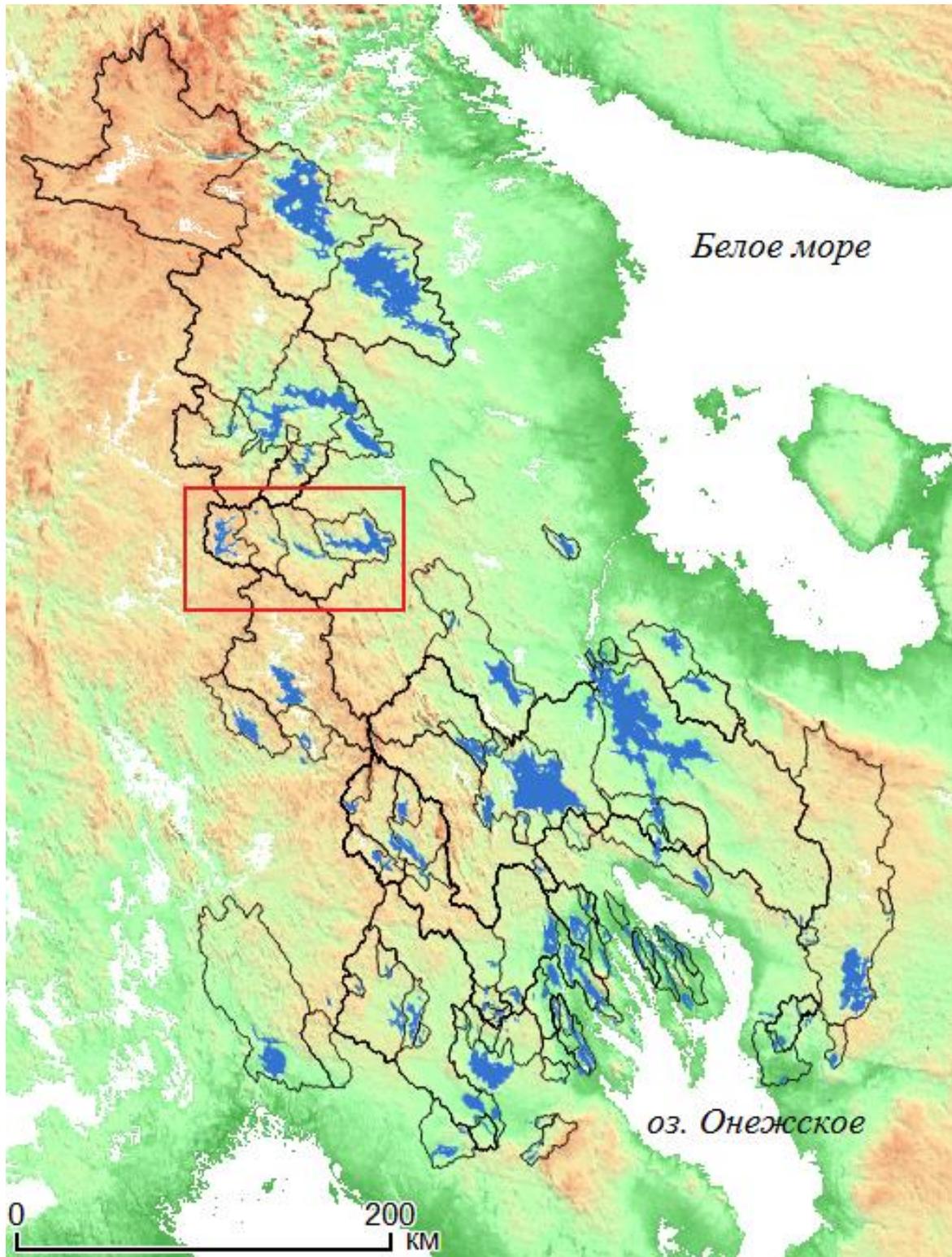


Рис. 3. Озёра, входящие в ГИС экспертной системы, и их водосборы
Красный прямоугольник – границы рис. 4
Fig. 3. Lakes and catchments of the expert system.
Red rectangle is the borders of fig. 4

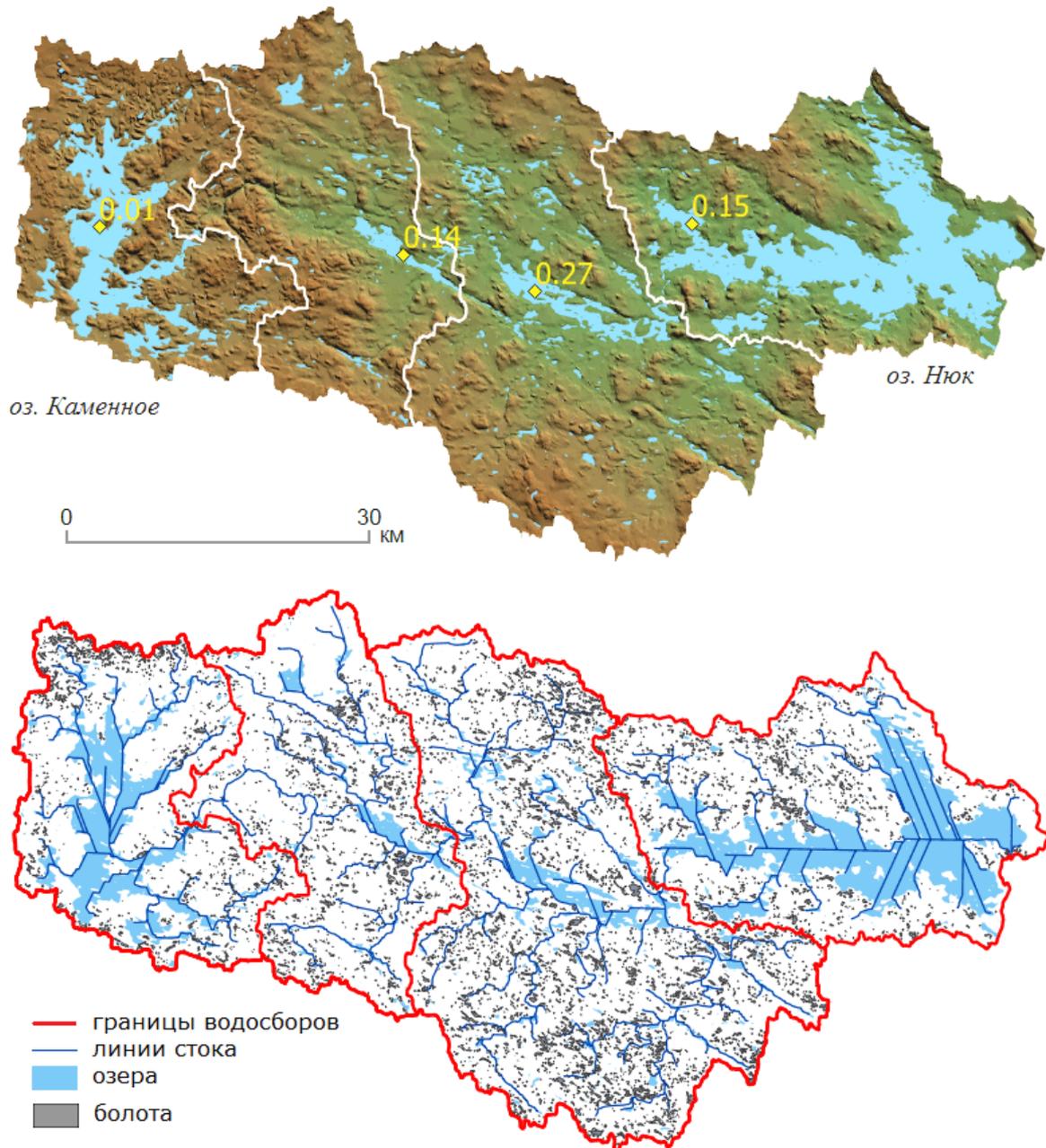


Рис. 4. Фрагмент основных ГИС водосборов – рельеф (вверху), заболоченность и гидрографическая сеть (внизу)
Fig. 4. The fragment of the main GIS layers – relief (top) and hydrographic network (below)

Основанная на данных дистанционного зондирования ГИС позволяет выявлять не только структуру, но и динамику изменений экосистем водосборов. На снимках Landsat чётко идентифицируются леса, возникшие на вырубках 40–50-летней давности. Соответственно, по самым ранним снимкам 1980-х годов можно восстановить состояние лесов, предшествующее началу массовых заготовок леса в 1950-х годах и проявлений изменений климата, то есть близкое к естественному, «фоновому». Таким образом, данные ГИС являются исходной точкой мониторинга на будущие времена.

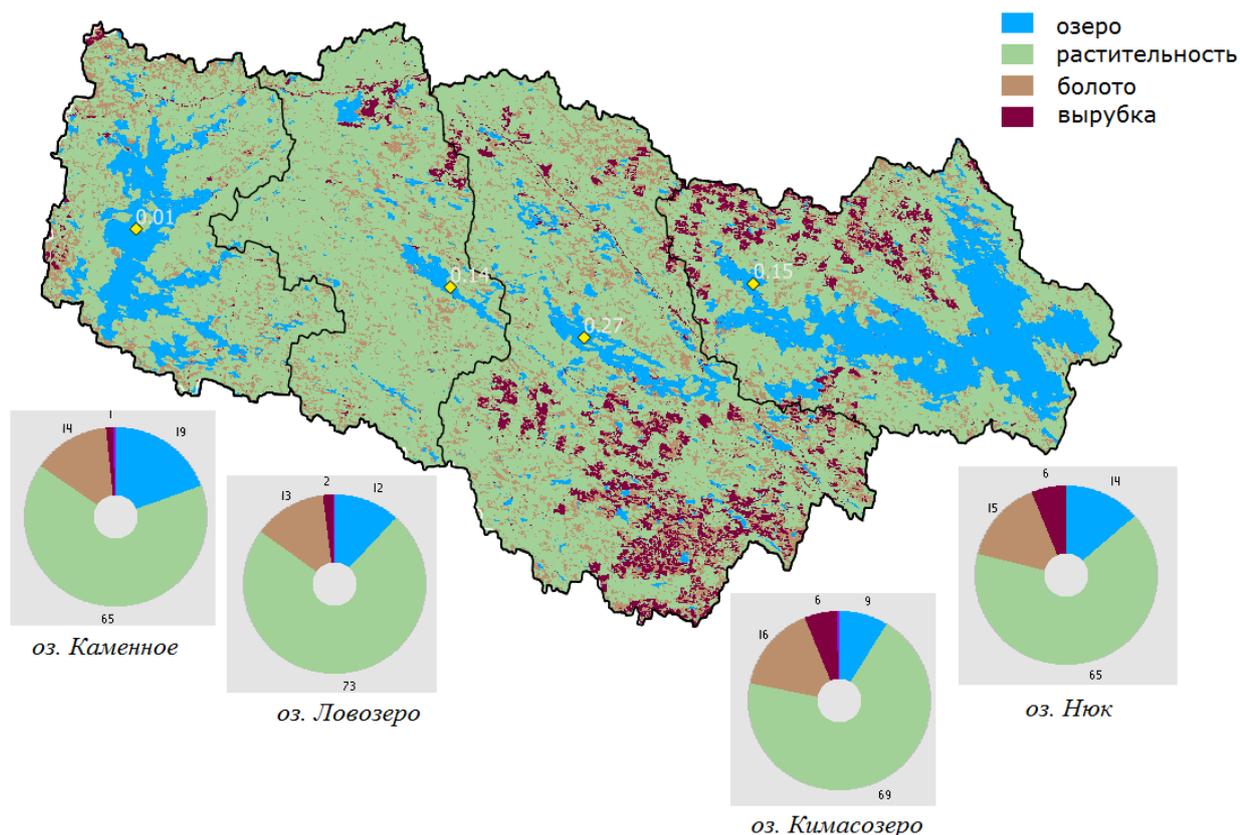


Рис. 5. Антропогенная нарушенность водосборов
 Fig. 5. Anthropogenic disturbance of watersheds

ВЫВОДЫ

Описанная методика позволяет выявить пространственную структуру экосистем водосборов и гидрографической сети изучаемой территории с недостижимой ранее детальностью и объективностью. Важность ГИС водосборов для экспертной системы исключительно высока, поскольку её принцип – прогнозирование неизвестных характеристик озёр, исходя из известных. Вследствие огромного количества озёр натурные данные имеются лишь для ограниченного количества объектов, тогда как ГИС содержит информацию для **всех** водосборов **всех** озёр Карелии по целому ряду физико-географических и экологических показателей:

- структура и динамика лесных и болотных экосистем, определяющих продукцию ОВ и транспирацию;
- антропогенные нарушения водосбора (вырубки), начиная с 1950-х годов;
- ландшафтный контекст (рельеф, тип четвертичных отложений: скалы, морена, пески, глины, торф);
- геоморфометрические данные, определяющие интенсивность поверхностного стока.

ГИС экосистем водосборов даёт пространственную основу для моделирования процессов формирования поверхностного стока от водоразделов по лесным и болотным экосистемам до водоёмов. Только таким способом можно прогнозировать изменения экспорта ОВ в условиях изменения климата, в частности, учитывая отдельно летний сток с лесных экосистем и зимний – с болот. С другой стороны, использование ГИС способствует

выявлению пробелов в гидрохимических данных и обеспечивает оптимальное планирование натуральных исследований.

В ближайшее время планируется расширение территории ГИС в направлениях Кольского полуострова на севере, водосборов рек Онеги и Северной Двины – на востоке, имея в виду перспективную цель – включение ГИС в глобальную модель климатической системы Земли.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the State task of the Northern Water Problems Institute KarRC RAS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зобкова М.В., Ефремова Т.А., Лозовик П.А., Сабылина А.В. Баланс органического вещества в озёрах Карелии. Озёра Евразии: проблемы и пути их решения. Материалы 1-й Межд. конф. (11–15 сентября 2017 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. С. 358–364.
2. Калинин Н.М., Филатов Н.Н., Теканова Е.В., Балаганский А.Ф. Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений. Региональная экология, 2018. № 2 (52). С. 65–73. DOI:10.30694/1026-5600-2018-2-65-73.
3. Карпечко Ю.В. Влияние рубок на сток с лесопокрытой части водосбора Онежского озера. Труды КарНЦ РАН, 2016. № 5. С. 13–20. DOI: 10.17076/lim285.
4. Карпечко Ю.В., Бондарик Н.Л. Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таёжной зоне Европейского Севера России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 225 с.
5. Крестовский О.И. Влияние вырубок и восстановления лесов на водность рек. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 118 с.
6. Литинский П.Ю. (а) 3D-модель спектрального пространства снимков Landsat как основа геоматической модели бореальных экосистем. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Материалы Междунар. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. Т. 24. Ч. 2. С. 116–128. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-116-128.
7. Литинский П.Ю. (б) Пространственно-временная модель наземных экосистем водосбора Онежского озера. Труды КарНЦ РАН, 2018. № 3. С. 94–106. DOI: 10.17076/lim742.
8. Мениуткин В.В., Филатов Н.Н., Потахин М.С. Разработка экспертной системы «Озёра Карелии». Ч. 1. Порядковые и номинальные характеристики озёр. Водные ресурсы, 2009. Т. 36. № 2. С. 160–171.
9. Озёра Карелии. Справочник. Ред. Н.Н.Филатов, В.И. Кухарев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
10. Bosch J.M., Hewlett J.D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. Journal of Hydrology, 1982. No 55. P. 3–23.
11. Hongve D., Van Hees P.A.W., Lunstrom U.S. Dissolved components in precipitation water percolated through forest litter. European Journal of Soil Science, 2000. No 51. Iss. 4. P. 667–677.
12. Ide J., Finer L., Lauren A., Piirainen S., Launainen S. Effects of clear-cutting on annual and seasonal runoff from a boreal forest catchment in eastern Finland. Forest Ecology and Management, 2013. V. 304. P. 482–491.

13. *Litinsky P.* Visualization of Landsat image spectral space as a method of boreal ecosystems geomatic modeling (on the example of Eastern Fennoscandia). *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*, 2018. V. 6. Iss. 3. DOI: 10.4172/2327-4581.1000183.
14. *Lofts S., Simon B.M., Tipping E., Woof C.* Modeling the solid-solution partitioning of organic matter in European forest soils. *European Journal of Soil Science*, 2001. No 52. P. 215–226.

REFERENCES

1. *Bosch J.M., Hewlett J.D.* A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 1982. No 55. P. 3–23.
 2. *Hongve D., Van Hees P.A.W., Lunstrom U.S.* Dissolved components in precipitation water percolated through forest litter. *European Journal of Soil Science*, 2000. No 51. Iss. 4. P. 667–677.
 3. *Ide J., Finer L., Lauren A., Piirainen S., Launainen S.* Effects of clear-cutting on annual and seasonal runoff from a boreal forest catchment in eastern Finland. *Forest Ecology and Management*, 2013. V. 304. P. 482–491.
 4. *Kalinkina N.M., Filatov N.N., Tekanova E.V., Balaganskij A.F.* Long-term dynamics of iron and phosphorus runoff into Onega Lake with Shuya River in conditions of climatic changing. *Regional ecology*, 2018. No 2 (52). P. 65–73. DOI:10.30694/1026-5600-2018-2-65-73 (in Russian).
 5. *Karpechko Yu.V.* Influence of cuttings on the runoff from the forest-covered part of the catchment area of Onega Lake. *Proceedings of the Karelian Scientific Center of RAS*, 2016. No 5. P. 13–20. DOI: 10.17076/lim285 (in Russian).
 6. *Karpechko Yu.V., Bondarik N. L.* Hydrological role of forestry and forest-industrial works in the taiga zone of the European North of Russia. *Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of RAS*, 2010. 225 p. (in Russian).
 7. *Krestovskiy O.I.* Influence of logging and restoration of forests on the water content of rivers. *Leningrad: Hydrometeo Publishing house*, 1986. 118 p. (in Russian).
 8. *Lakes of Karelia.* Reference book. Eds. N.N. Filatov, V.I. Kukharev. *Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of RAS*, 2013. 464 p. (in Russian).
 9. *Litinsky P.* (a) 3D model of the spectral space of Landsat images as the basis of the boreal ecosystems geomatic model. *InterCarto. InterGIS. Proceedings of the International conference.* *Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of RAS*, 2018. V. 24. Part 2. P. 116–128. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-116-128 (in Russian, abs English).
 10. *Litinsky P.* (b) Spatial-temporal model of terrestrial ecosystems in the Onega Lake catchment. *Proceedings of the Karelian Scientific Center of RAS*, 2018. No 3. P. 94–106. DOI: 10.17076/lim742 (in Russian).
 11. *Litinsky P.* Visualization of Landsat image spectral space as a method of boreal ecosystems geomatic modeling (on the example of Eastern Fennoscandia). *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*, 2018. V. 6. Iss. 3. DOI: 10.4172/2327-4581.1000183.
 12. *Lofts S., Simon B.M., Tipping E., Woof C.* Modeling the solid-solution partitioning of organic matter in European forest soils. *European Journal of Soil Science*, 2001. No 52. P. 215–226.
 13. *Menshutkin V.V., Filatov N.N., Potakhin M.S.* “Karelian Lakes” expert system: 1. Ordinal and nominal characteristics of lakes. *Water Resources*, 2009. V. 36. No 2. P. 148–159. DOI: 10.1134/S0097807809020031 (in Russian).
 14. *Zobkova M.V., Yefremova T.A., Lozovik P.A., Sabylina A.V.* Balance of organic matter in the lakes of Karelia. *Lakes of Eurasia: problems and solutions. Proceedings of the 1st International conference (Sept. 11–15, 2017).* *Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of RAS*, P. 358–364 (in Russian).
-