

22. Преображенский В. С., Александрова Т. Д., Куприянова Т. П. Основы ландшафтного анализа. М., 1988.
 23. Экотоны в биосфере / под ред. проф. В. С. Залетаева. М., 1997.
 24. Коломыц Э. Г. Ландшафтные исследования в переходных зонах: методологический аспект. М., 1986.
 25. Ретеюм А. Ю. Земные миры. М., 1988.
 26. Гродзинский М. Д. Пізнання ландшафту: місце і простір.: в 2 т. Київ, 2005. Т. 1.
 27. Гродзинский М. Д., Шищенко П. Г. Ландшафтно-экологический анализ в мелиоративном природопользовании. Киев, 1993.
 28. Колбовский Е. Ю. Ландшафтное планирование. М., 2008.
 29. Яцухно В. М., Давыдик Е. Е. Пространственные взаимосвязи в ландшафтах и их геоэкологическая роль. Развитие идей В. А. Дементьева в совершенствовании геоморфологических и ландшафтных исследований. Минск, 1998. С. 43–46.
 30. Perera A. H., Drew C. A., Johnson C. J. (eds.). Expert knowledge and its application in landscape ecology. New York, 2011.

Поступила в редакцию 06.02.13.

Валентин Минович Яцухно – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий НИЛ экологии ландшафтов.
Валерий Анатольевич Бакарасов – кандидат географических наук, доцент кафедры географической экологии.

УДК 91:004(043.3)

Д. М. КУРЛОВИЧ, С. В. ГРИБ, Н. В. КОВАЛЬЧИК, Д. В. ИВАНОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Отражена суть методики проведения гидрологического ГИС-моделирования в среде ГИС ArcGIS, позволяющая в автоматическом режиме по грид-поверхности рельефа производить расчет основных русловых и бассейновых морфометрических характеристик, влияющих на характер поверхностного стока, выделять постоянные и временные водные потоки, выполнять водосборную дифференциацию территории. Определен ряд направлений использования геоданных, получаемых в результате гидрологического ГИС-моделирования. Для ключевых участков на территории Республики Беларусь (Белорусское Поозерье, бассейн верхнего течения р. Свислочь, Припятское Полесье) проведены разномасштабные исследования, позволившие решить ряд научных и прикладных задач.

Ключевые слова: географические информационные системы (ГИС); гидрологическое ГИС-моделирование; структурно-геоморфологический анализ; зоны затопления; перенос поверхностным стоком техногенных загрязнений; типизация водосборов по условиям обводнения болот.

The methodology of hydrological GIS-modeling in the ArcGIS environment is described. The Hydrology tools in ArcGIS are used to model the flow of water across a surface. Usually, digital elevation model is used as input to quantify the characteristics of the land surface (flow accumulation, flow direction, identifying stream networks, basins, watersheds). The main directions of use of hydrological GIS-models for the solution of scientific and applied problems (the structural-geomorphological analysis, calculation of zones of flooding at change of water level in rivers, modeling of pollution transfer in superficial drain, typification of watersheds on inundation of bogs) are identified. The methodology of hydrological GIS-modeling within the key areas in the Republic of Belarus (Belarusian Poozerye, Svisloch River, Pripjat Polesye) is tested.

Key words: geographical informational systems (GIS); hydrological GIS-modeling; structural-geomorphological analysis; zones of flooding; pollution transfer in superficial drain; typification of watersheds on inundation of bogs.

Гидрологическое ГИС-моделирование представляет собой комплексную методику, позволяющую в автоматическом режиме по грид-поверхности рельефа производить расчет основных русловых и бассейновых морфометрических характеристик, влияющих на характер поверхностного стока, выделять постоянные и временные водные потоки, выполнять водосборную дифференциацию территории [1, 2]. Моделирование производится в программной среде географической информационной системы (ГИС) ArcGIS и включает следующие этапы:

1. Построение геометрической сети постоянных водных потоков.
2. Представление гипсометрической поверхности в виде модели Topogrid.
3. Расчет основных русловых и бассейновых морфометрических характеристик, влияющих на характер поверхностного стока.
4. Идентификация постоянных и временных водотоков, определение их порядка.
5. Выполнение бассейновой и водосборной дифференциации территории.

На начальном этапе моделирования на основе векторного линейного слоя постоянных водотоков строится геометрическая сеть, состоящая из ребер и соединений. Создание сетевой модели позволяет отслеживать связность водотоков, задавать направление их течения и производить анализ движения воды в пространстве.

Для построения гидрологически корректной поверхности рельефа в ArcGIS существует функция Raster to Topo, позволяющая рассчитывать модель Topogrid, качество которой выше, чем у гридов, получаемых обычными методами интерполяции (обратно взвешенных расстояний, сплайн, кригинг)

и др.). Для ее создания используются векторные слои горизонталей, отметок высот и урезов воды, естественных и искусственных водоемов, а также сформированная на первом этапе моделирования геометрическая сеть постоянных водных потоков.

Расчет основных русловых и бассейновых морфометрических характеристик осуществляется с помощью линейки инструментов «Гидрология» модуля Spatial Analyst ГИС ArcGIS на основе модели Topogrid. Создание поверхности направления стока позволяет определить в пределах объекта исследований территории разнонаправленного (по сторонам света) стока. Инструментом «Суммарный сток» в автоматическом режиме выявляется сеть постоянных и временных водотоков. Опция «Длина линии стока» рассчитывает суммарные длины водных потоков в пределах территории исследований.

Из грид-модели сети постоянных и временных водотоков реки и элементы овражно-балочной сети конвертируются в отдельный векторный слой. В модуле «Гидрология» ГИС ArcGIS реализован алгоритм расчета порядка водотоков по методам Страллера и Шрива [1].

На завершающем этапе моделирования по грид-поверхности направления стока автоматически выделяются бассейны рек и водосборные площади.

Созданные в результате гидрологического ГИС-моделирования геоданные могут быть использованы для решения некоторых научных и прикладных задач комплекса наук о Земле по следующим направлениям:

- 1) структурно-геоморфологический анализ;
- 2) расчет зон затопления при изменении уровня воды в водных объектах;
- 3) моделирование характера переноса техногенных загрязнений за счет поверхностного стока;
- 4) типизация водосборов по условиям обводнения болот.

Структурно-геоморфологический анализ по методу В. П. Философова [3] был проведен нами для Поозерской физико-географической провинции [4]. Из модели рельефа Topogrid, созданной на базе цифровой топографической карты масштаба 1:100 000, были выделены постоянные и временные водотоки. Порядок долин определялся по методу Страллера. На основе слоя порядков водотоков и модели Topogrid строились такие морфометрические грид-поверхности, как базисные, остаточный рельеф, разности между базисными поверхностями, а также морфоизогипсы (по методу Л. Б. Аристарховой [5]).

Для интерпретации результатов структурно-геоморфологических исследований выполнялись визуализация, анализ и моделирование структурно-геологических, литологических и геоморфологических данных с использованием ГИС, проводились корреляционный ГИС-анализ, анализ мощностей и фаций, выявление тополинементов. В исследованиях также использовались данные дистанционного зондирования.

В результате было установлено, что в условиях молодого ледниково-аккумулятивного рельефа Белорусского Поозерья ни один из морфометрических методов не позволяет исключить из анализа формы рельефа экзогенного (ледникового) происхождения. Поэтому морфоструктурный план исследуемой территории изучался по поверхности кровли дочетвертичных отложений, созданной в результате растрового ГИС-анализа данных бурения путем построения по ней морфоизогипс. В итоге были выделены 3 морфоструктурных района и 11 крупных морфоструктур (рис. 1).

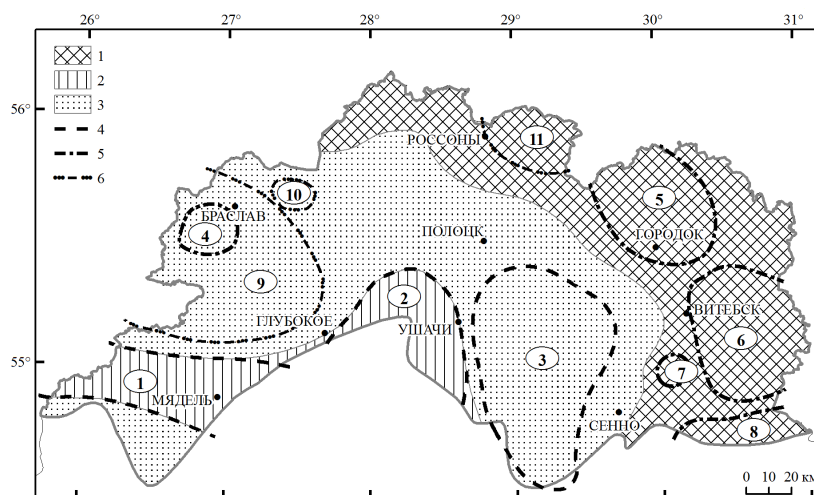


Рис. 1. Морфоструктуры Белорусского Поозерья.

Морфоструктурные районы: 1 – Восточно-Белорусская высокая пластово-денудационная столово-останцовая равнина; 2 – Центрально-Белорусская высокая пластово-денудационная структурная равнина; 3 – Северо-Белорусская низкая пластово-денудационная равнина. *Морфоструктуры по отношению к тектоническим структурам кристаллического фундамента:* 4 – прямые; 5 – обращенные; 6 – переходные. Цифрами в кружочках обозначены крупные морфоструктуры: 1 – Нарочанская; 2 – Кубличско-Лепельская; 3 – Чашникская; 4 – Даугауляйская; 5 – Прудовская; 6 – Витебская; 7 – Массоровская; 8 – Дубровенская; 9 – Пооставско-Браславская; 10 – Миорская; 11 – Нещердовская

На протяжении четвертичного периода морфоструктурные черты Белорусского Поозерья были в значительной степени трансформированы деятельностью плейстоценовых оледенений. Сформировались эндо-экзогенные морфоскульптуры, в образовании которых эндогенные процессы проявлялись скрыто и сложно и оказывали влияние на их развитие в целом, конкретные же морфологические элементы были созданы экзогенными процессами.

Региональные и локальные площадные эндо-экзогенные морфоскульптуры были выделены путем обобщения результатов, полученных при построении карт морфоизогипс поверхностей подошвы четвертичных отложений и кровли моренных и межморенных горизонтов плейстоцена, современного рельефа и, кроме того, карт базисных поверхностей 3–7 порядков, порядков долин, остаточного рельефа и разностей между базисными поверхностями. Всего выделено 4 региональные и 10 локальных эндо-экзогенных морфоскульптур (рис. 2). Установлено, что основное время их возникновения – вторая половина среднего и поздний плейстоцен. Основными геодинамическими факторами, определившими характер их заложения и развития, являются: формирование в среднем плейстоцене Восточно-Балтийской рифтовой системы, воздействие ледниковых покровов (изостатическое прогибание под ледниковыми покровами, поднятие блоков земной коры по периферии области оледенений, гляциотектоническая переработка субстрата).

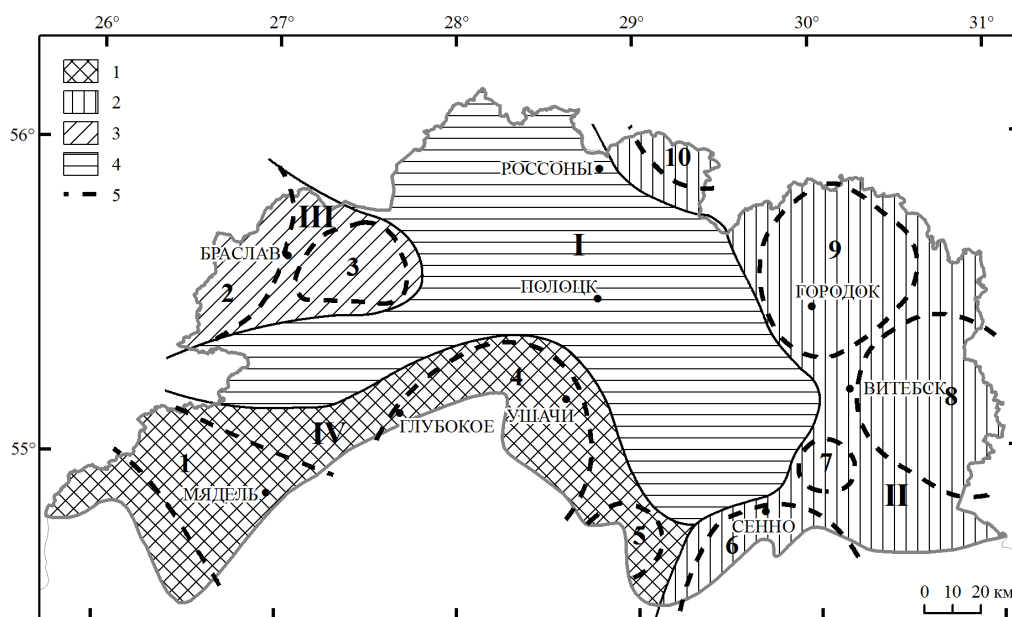


Рис. 2. Площадные эндо-экзогенные морфоскульптуры Белорусского Поозерья.

Региональные положительные эндо-экзогенные морфоскульптуры: 1 – согласные с антиклинальными структурами осадочного чехла и выступами фундамента; 2 – согласные со структурами верхних горизонтов осадочного чехла, соответствующие крупным впадинам фундамента и нижних горизонтов осадочного чехла; 3 – частично согласные со структурами верхних горизонтов осадочного чехла, соответствующие синклиналим и седловинным структурам фундамента и нижних горизонтов осадочного чехла; 4 – региональные отрицательные эндо-экзогенные морфоскульптуры, согласные со структурами верхних горизонтов осадочного чехла и соответствующие седловинным структурам фундамента; 5 – локальные положительные эндо-экзогенные морфоскульптуры. Цифрами обозначены: I – Полоцкая депрессия, II – Северо-Восточный купол, III – Браславский купол, IV – Нарочано-Ушачский купол; 1 – Нарочанская, 2 – Даугаулайская, 3 – Миорская, 4 – Кубличско-Лепельская, 5 – Зеленоостровская, 6 – Сенненская, 7 – Массоровская, 8 – Витебская, 9 – Прудовская, 10 – Нещердовская локальные положительные эндо-экзогенные морфоскульптуры

Для выявления линейных эндо-экзогенных морфоскульптур анализировался характер рисунка базисных поверхностей 3-го и 4-го порядков и морфоизогипс. Всего на территории Поозерской провинции была выделена 21 линейная эндо-экзогенная морфоскульптура (рис. 3). Они были сопоставлены с разломами кристаллического фундамента, что позволило выделить среди них две основные группы морфоскульптур: 1) представляющие собой активизированные фрагменты разломов кристаллического фундамента и осадочного чехла; 2) проявившиеся на неотектоническом этапе.

Растровый и векторный ГИС-анализ геолого-геоморфологических данных позволил подтвердить предположение о том, что со второй половины среднего и в позднем плейстоцене под действием гляциоизостазии произошла активизация некоторых дизъюнктивных нарушений кристаллического фундамента и осадочного чехла или их частей. В геологическом разрезе признаками дифференцированных движений по активным разломам являются нарушения первоначального залегания отложений, выраженные в форме уступов, флексур, разрывов слоев, а также резкое изменение мощности и состава аккумуляций на разных крыльях активной зоны. В мезо- и микрорельефе данные морфоскульптуры представлены в форме линейно ориентированных краевых ледниковых образований, озов и озоподобных гряд, гляциодислокаций, мосаров, спрямленных участков речных долин, прямолинейных эрозионных и абразионных уступов, линейно ориентированных озерных котловин, золовых гряд и холмов.

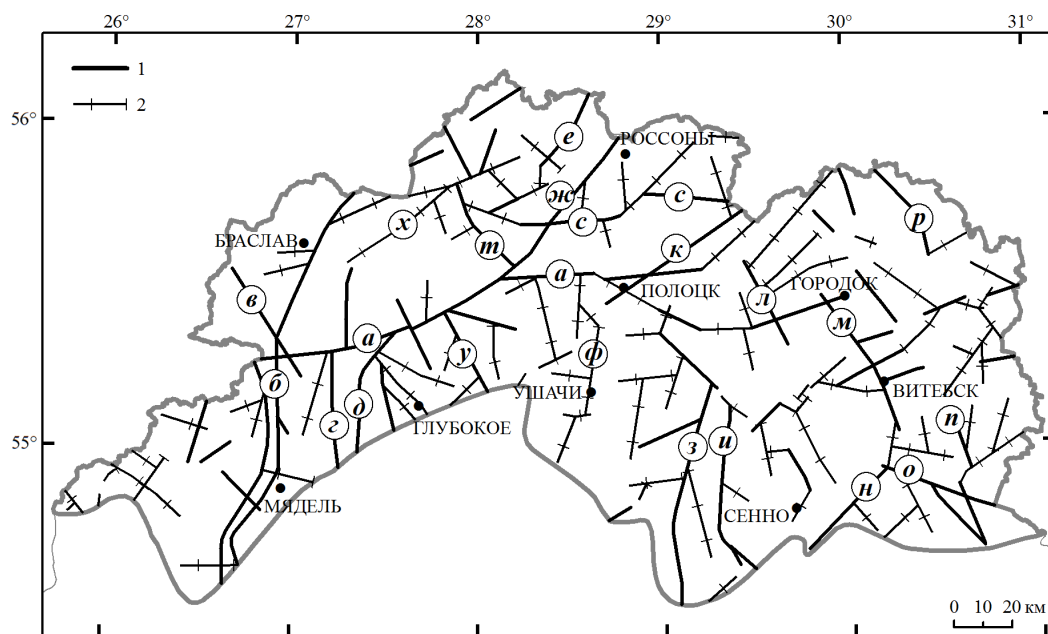


Рис. 3. Линейные эндо-экзогенные морфоскульптуры Белорусского Поозерья.

Эндо-экзогенные морфоскульптуры линейного характера: 1 – представляющие собой активизированные фрагменты разломов кристаллического фундамента и осадочного чехла; 2 – проявившиеся на неотектоническом этапе. Буквами обозначены морфоскульптуры: а – Полоцкая, б – Поставско-Браславская, в – Богинская, г – Воропаевская, д – Козловщинская, е – Миловидовская, ж – Борковичская, з – Чашникская, и – Усвейская, к – Полотская, л – Обольская, м – Витебская, н – Заозерьевская, о – Лучосенская, п – Веретейская, р – Ловатская, с – Дрисненская, т – Верхнедвинская, у – Мнютенская, ф – Ушачская, х – Вятская

Расчет зон затопления при изменении уровня воды в водных объектах выполнялся для территории Белорусского Поозерья (угроза затопления рассматривалась как один из факторов оценки геолого-геоморфологического риска [4]) и бассейна верхнего течения р. Свислочь [6]. Моделирование производилось в среде ГИС ArcGIS при помощи набора инструментов Riparian Topography Toolbox [7]. Исходными данными для расчета служили геометрическая сеть водных потоков и модель гипсометрической поверхности Topogrid.

В результате ГИС-анализа была построена грид-модель, в которой каждой ячейке присвоено значение высоты над руслом реки, полученное путем вычитания средневзвешенной абсолютной отметки урезов близлежащих водных объектов (в пределах программно заданного радиуса) из ее абсолютной отметки над уровнем моря (рис. 4 а). Используя данные многолетних наблюдений за уровнем воды на гидрологических постах, мы выявили границы зон затопления в случае паводка 1, 5, 10, 25 и 40 % обеспеченности (рис. 4 б).

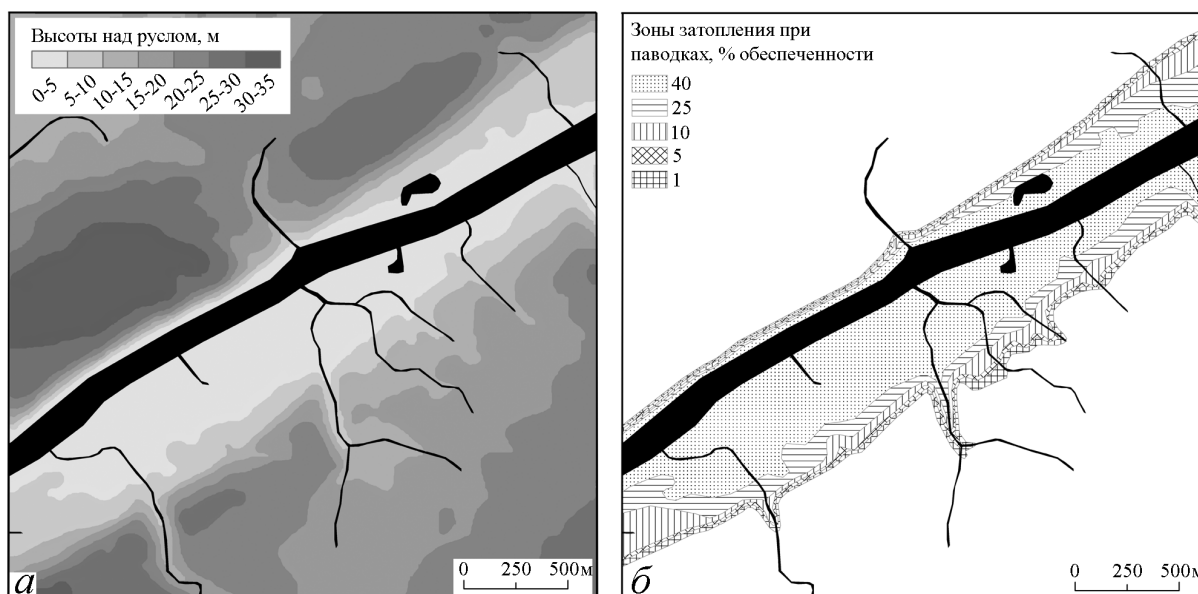


Рис. 4. Пример расчета зон затопления при изменении уровня воды в водных объектах (р. Западная Двина у д. Барвин Витебского района)

Моделирование возможного пути переноса техногенных загрязнений (например, пятна нефтепродуктов) за счет поверхностного стока выполнялось для бассейна верхнего течения р. Свислочь [6],

а также бассейна р. Друйка. В качестве исходных данных были использованы геометрическая сеть водных потоков и грид-модель длины постоянных и временных водотоков. По сети определен максимальный путь продвижения нерастворимых в воде загрязнителей. Модель длины водотоков позволила произвести расчет скорости движения пятна загрязнения и определить возможные способы его утилизации, исходя из времени принятия соответствующих мер. Кроме того, был произведен расчет площади земель различных видов, которые будут подвержены экологической опасности (в пределах прибрежной и водоохранной зон) в результате попадания нефтепродуктов в водный поток при различных временных условиях его локализации (рис. 5).

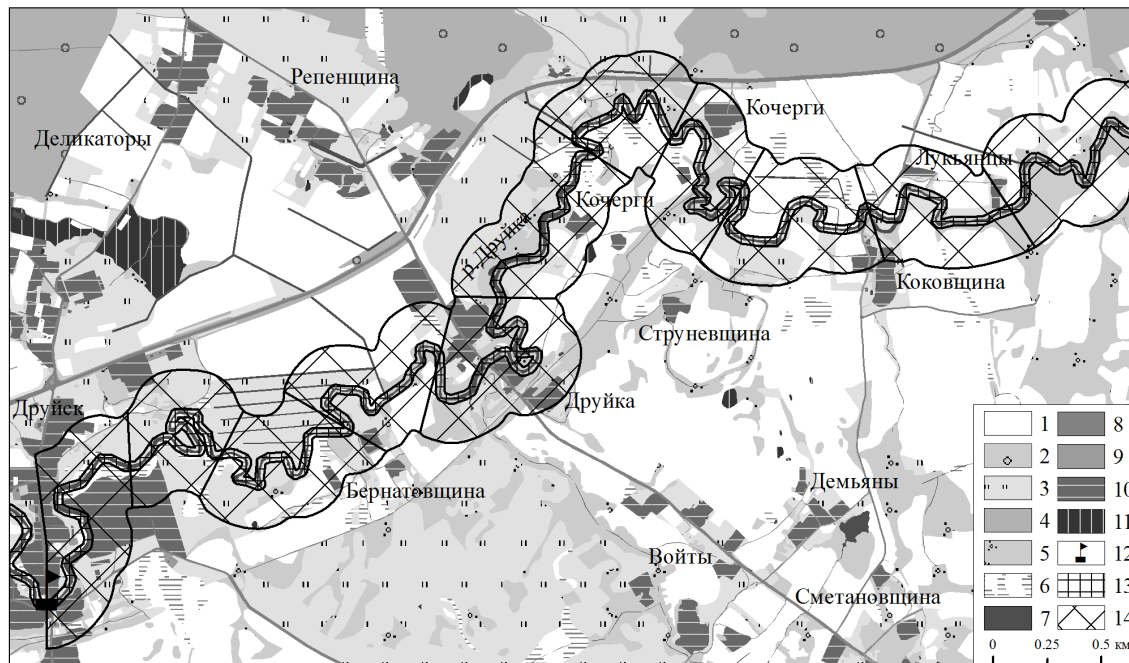


Рис. 5. Пример моделирования характера переноса техногенных загрязнений за счет поверхностного стока (р. Друйка ниже д. Друйск Браславского района).

Виды земель: 1 – пахотные, 2 – под постоянными культурами, 3 – луговые, 4 – лесные, 5 – под древесно-кустарниковой растительностью, 6 – под болотами, 7 – под водными объектами, 8 – под дорогами и иными транспортными коммуникациями, 9 – под улицами и другими местами общего пользования, 10 – под застройкой, 11 – иные, 12 – потенциальное место попадания нефтепродуктов из нефтепровода «Дружба» в р. Друйка, 13, 14 – прибрежная полоса и водоохранная зона р. Друйка (с разбиением на часовые интервалы продвижения пятна нефтепродуктов по одному потоку)

Типизация водосборов по условиям обводнения болот осуществлялась для территории Припятского Полесья (в границах гидрогеологического районирования [9]) с целью оптимизации выбора направления рекультивации выработанных торфяных месторождений.

Следует отметить, что болотные массивы выполняют важную буферную функцию для гидрологического бассейна, в составе которого они находятся: накапливают большие запасы воды во время влажных периодов и являются источниками влаги в засуху. Водные потоки связывают всю водосборную территорию с болотными массивами, а также отдельные районы единого торфяно-болотного комплекса между собой. Изменение уровня грунтовых вод на водосборе может приводить к изменениям на всей площади торфяника [8]. Буферный эффект болот для водосбора зависит от водопроницаемости пород, типа питания болот. Наиболее эффективно справляются с этой функцией болота атмосферно-грунтового типа питания на слабопроницаемых отложениях. На осушенных торфяниках с открытыми дренажными системами темпы просачивания воды сквозь торфяную залежь снижаются, что препятствует образованию активного поверхностного стока.

Для территории Припятского Полесья был выполнен весь комплекс гидрологического ГИС-моделирования на основе топографии масштаба 1:200 000 [10]. Типизация водосборов малых рек (с учетом каналов) осуществлялась путем ГИС-анализа, сопряженного с пространственными данными гидрогеологического характера [9].

В результате исследования водосборы малых рек Припятского Полесья были сгруппированы в восемь типов по условиям обводнения болот (рис. 6). Эти данные могут быть учтены при выборе направлений рекультивации выработанных торфяных месторождений (сельскохозяйственное, лесохозяйственное, рыбохозяйственное, водохозяйственное, рекреационное, природоохранное, строительное, реабилитационное и др.).

Таким образом, нами получены следующие результаты.

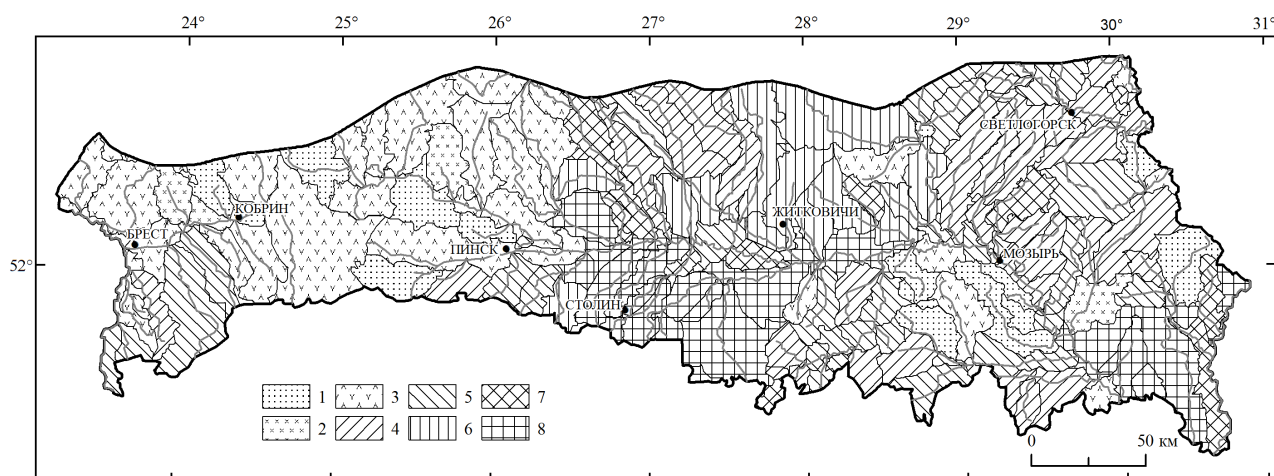


Рис. 6. Типы водосборов малых рек (с учетом каналов) Припятского Полесья по условиям обводнения болот.

Распространение отложений: *днепровской морены*: 1 – с низкой и средней проводимостью верхнего водоносного горизонта, болотами атмосферного и грунтового питания, 2 – с низкой водопроницаемостью, болотами смешанного питания, 3 – с низкой и средней водопроницаемостью, болотами смешанного питания; *островное распространение днепровских моренных суглинков и голоценовых озерно-аллювиальных глин*: 4 – с низкой и средней водопроницаемостью, болотами атмосферного и грунтового питания, 5 – с низкой и средней водопроницаемостью, болотами смешанного питания, 6 – с высокой водопроницаемостью, болотами смешанного питания; *слабопроницаемых дочетвертичных отложений*: 7 – со средней водопроницаемостью, болотами атмосферного и грунтового питания, 8 – со средней и высокой водопроницаемостью, болотами смешанного питания

1. Апробирована методика проведения гидрологического ГИС-моделирования в среде ГИС ArcGIS, позволяющая в автоматическом режиме по грид-поверхности рельефа производить расчет основных русловых и бассейновых морфометрических характеристик, влияющих на характер поверхностного стока, выделять постоянные и временные водные потоки, выполнять водосборную дифференциацию территории.

2. Определен ряд направлений использования геоданных, выявленных в процессе гидрологического ГИС-моделирования (структурно-геоморфологический анализ, расчет зон затопления при изменении уровня воды в водных объектах, моделирование характера переноса техногенных загрязнений за счет поверхностного стока, типизация водосборов по условиям обводнения болот).

3. Для ключевых участков на территории Республики Беларусь (Белорусское Поозерье, бассейн верхнего течения р. Свислочь, Припятское Полесье) в рамках обозначенных направлений проведены разномасштабные исследования, позволившие решить некоторые научные и прикладные задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hydrology toolset. <http://resources.arcgis.com>.
2. Гриб С. В. Моделирование гидрологической сети и основных характеристик поверхностного стока с помощью ГИС // Научный потенциал молодежи – будущему Беларуси: материалы Междунар. молодежной науч.-практ. конф. Пинск, 2010. С. 150–152.
3. Философов В. П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов, 1975.
4. Курлович Д. М. Пространственная дифференциация и динамика морфоструктур Белорусского Поозерья: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23. Минск, 2011.
5. Аристархова Л. Б. Морфоструктурный анализ аэрокосмических снимков и топографических карт. М., 2000.
6. Гриб С. В. Гидрологическое ГИС-моделирование верхнего течения реки Свислочь // Материалы докл. XVI Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». М., 2010.
7. Riparian Topography Toolbox for ArcGIS. <http://arcscripts.esri.com>.
8. Биосферно-совместимое использование лесных и болотных экосистем: Мировые тенденции и опыт Беларуси / В. М. Подолько, Н. Н. Бамбалов, М. Н. Вергейчик и др. Минск, 2003.
9. Козлов М. Ф., Дронова Л. М. Карта районирования территории Припятского Полесья по источникам обводнения болот и заболоченных земель. М-б 1:500 000. Минск, 1970.
10. Ковальчик Н. В., Курлович Д. М., Иванов Д. В. Типизация малых водосборов Припятского Полесья по условиям обводненности болот // Проблемы природопользования: итоги и перспективы: материалы Междунар. науч. конф. (Минск, 21–23 нояб. 2012 г.). Минск, 2012. С. 141–143.

Поступила в редакцию 22.04.13.

Дмитрий Мирославович Курлович – кандидат географических наук, доцент кафедры почвоведения и земельных информационных систем.

Сергей Валерьянович Гриб – начальник отдела геоинформационных технологий Государственного центра картографо-геодезических материалов и данных Республики Беларусь.

Надежда Владимировна Ковальчик – кандидат географических наук, доцент кафедры почвоведения и земельных информационных систем.

Дмитрий Владимирович Иванов – инженер предприятия «Минскситстрой».