

В.В. Хромых, О.В. Хромых

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА В НАУЧНЫХ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТАХ (ТЕХНОЛОГИИ E-LEARNING)

Обобщается 20-летний опыт преподавания и научных исследований в сфере цифрового моделирования рельефа на кафедре географии Томского государственного университета. Рассмотрена концептуальная схема обучения технологиям ГИС и обработке данных дистанционного зондирования. Приведены примеры и различные виды электронных образовательных ресурсов. Описаны разработанные методики использования цифровых моделей рельефа в различных научно-исследовательских проектах, грантах и хозяйственных работах. Указаны перспективные направления дальнейших научных разработок.

Ключевые слова: геоинформационная система, ГИС, цифровая модель рельефа, дистанционное обучение, электронный образовательный ресурс, геопортал, мониторинг, окружающая среда.

Одним из существенных преимуществ технологий географических информационных систем (ГИС) над обычными «бумажными» картографическими методами исследований является возможность создания пространственных моделей в трёх измерениях. Основными координатами в таких ГИС-моделях помимо широты и долготы служат также данные о высоте. При этом система может оперировать с десятками и сотнями тысяч высотных отметок, а не с единицами и десятками, что было возможно при использовании методов «бумажной» картографии. В связи с доступностью быстрой компьютерной обработки громадных массивов высотных данных становится реально выполнимой задача создания максимально приближенной к действительности цифровой модели рельефа (ЦМР).

Цифровые модели рельефа – это особый вид трёхмерных математических моделей, представляющий собой отображение «рельефа» как реальных, так и абстрактных геополей (поверхностей) [1]. При этом в качестве «рельефа поверхности» в цифровой модели могут выступать кроме реального рельефа различные другие показатели и характеристики: атмосферное давление, температура воздуха, осадки, пластовое давление нефти, геофизические поля, концентрация загрязняющих веществ и т.п. Геополя могут быть как континуальными, так и дискретными, но для обоих типов применяется дискретная форма представления исходных данных.

Следует заметить, что обычно первичные данные цифрового моделирования рельефа имеются

или приводятся с использованием тех или иных операций к одному из двух наиболее широко распространенных представлений поверхностей в ГИС: растровому представлению (модель GRID) и триангуляционной модели (TIN). Исходя из этого, исторически выделились 2 альтернативные модели ЦМР [2]:

- основанные на чисто регулярных (матричных) представлениях поля рельефа отметками высот;
- структурные, одной из наиболее развитых форм которых являются модели на основе структурно-лингвистического представления.

В Томском государственном университете (ТГУ) на кафедре географии технологии цифрового моделирования рельефа стали внедряться в научную и образовательную деятельность в конце 1990-х гг. Первым успешным опытом стала цифровая модель рельефа, созданная на основе оцифрованных горизонталей и высотных отметок с топографических карт на район учебных географических практик в Северной Хакасии. В качестве программного обеспечения первоначально использовалась программа МАГ, разработанная на кафедре картографии и геоинформатики МГУ и предоставленная географам ТГУ [3]. Модель рельефа была построена методом кригинга и являлась собой регулярную сеть высот. Эта модель легла в основу учебной ГИС «Июс», созданной для территории района учебных практик [4]. В дальнейшем на кафедре географии ТГУ были апробированы методики полуавтоматической оцифровки высотных данных с помощью специализированных

программ-векторизаторов AutoVec, EasyTrace и создания ЦМР в программном комплексе Surfer (Golden Software). В конце 1990-х гг. уже была создана и ЦМР для учебной ГИС «Актру» [5].

Появление и быстрое развитие новых геоинформационных технологий потребовало переосмысления структуры подготовки специалистов-географов в ТГУ и изменений в учебном плане. До 1998 г. в учебном плане географов была лишь одна учебная дисциплина, связанная с новыми информационными технологиями, – геоинформатика (36 ч) в 3-м семестре. Этого было явно недостаточно. Поэтому с 1998 г. по инициативе авторов на кафедре географии ТГУ в учебный процесс была внедрена концептуальная схема обучения геоинформационным технологиям. Так, были

разработаны новые курсы: «Компьютерная графика», «ГИС», «Настольные картографические системы», «Построение баз геоданных», «Цифровые модели рельефа». Серьезным толчком к изменению подхода к ГИС-образованию в ТГУ благодаря сотрудничеству геолого-географического факультета ТГУ и ООО «Дата+» стало появление специализированного программного обеспечения компании ESRI Inc.: ARC/INFO 7.0.1 и ArcView GIS 3.0. Например, с помощью модуля 3D Analyst ArcView GIS (ESRI Inc.) были освоены и внедрены в образовательный процесс методы построения ЦМР на основе триангуляции Делоне в формате TIN и создания тематических карт важнейших морфометрических показателей (гипсометрии, крутизны и экспозиций склонов).

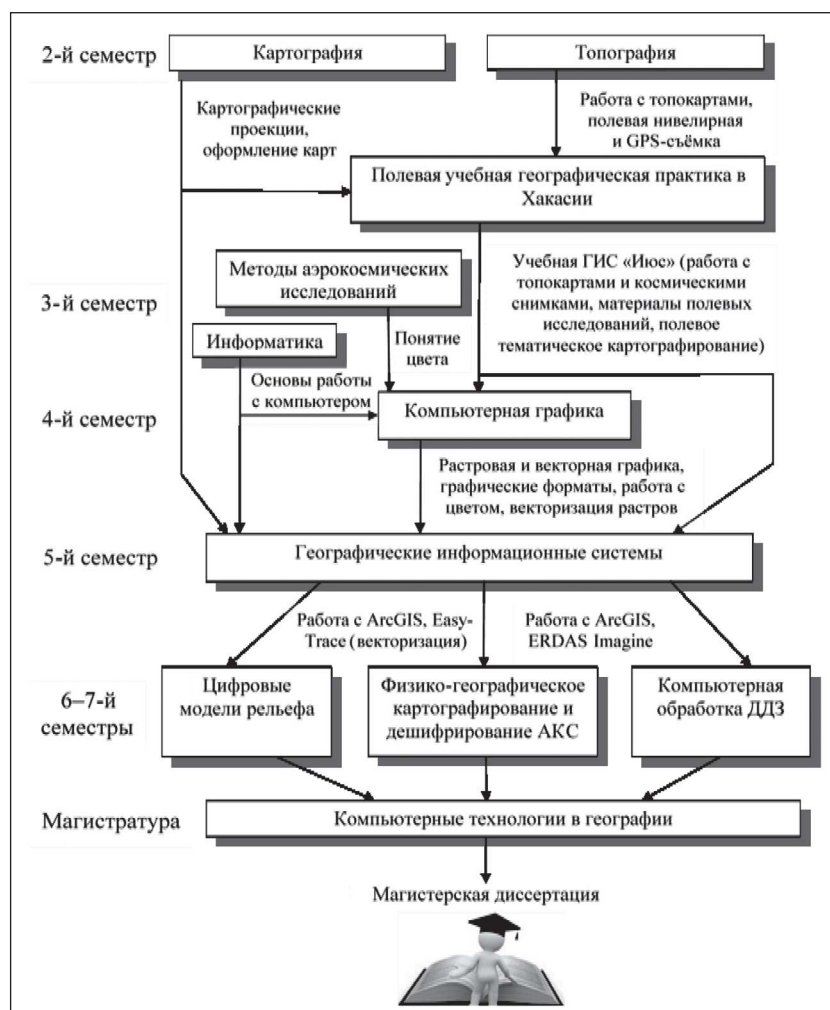


Рис. 1. Место курса «Цифровые модели рельефа» в концептуальной схеме обучения технологиям ГИС и обработки ДДЗ на кафедре географии ТГУ

Основным принципом ГИС-образования на кафедре географии ТГУ стала непрерывность обучения, т.е. учебные курсы были построены так, чтобы обучение геоинформационным технологиям велось от простого к сложному в каждом семестре без существенных перерывов, что позволяло студентам не «забывать» и не терять полученные навыки и компетенции. Курс «Цифровые модели рельефа» является одним из самых сложных для освоения, поэтому преподается в шестом семестре и занимает одно из последних мест в этой цепочке курсов (рис. 1).

В 2003 г. в связи с открытием компьютерного ГИС-класса кафедры географии в 6-м корпусе ТГУ и получением лицензионного программного обеспечения ArcGIS 8 (ESRI Inc.) и ERDAS Imagine (Leica Geosystems) концептуальная схема обучения ГИС-технологиям была расширена курсом «Компьютерная обработка данных дистанционного зондирования (ДДЗ)». В рамках этого курса впервые в ТГУ стали преподаваться технологии трёхмерного моделирования и создания виртуальных геоизображений на основе ЦМР, драпированных космическими снимками с помощью программы ERDAS Virtual GIS.

В процессе реализации инновационной образовательной программы ТГУ с 2007 г. стали активно внедряться новые формы дистанционного обучения – виртуальные лабораторные практикумы, которые являют собой электронные учебно-методические комплексы, включающие большой блок практических упражнений, созданных в пошаговом режиме с использованием мультимедийных анимационных технологий. Они доступны в сети Internet на сайте ИДО ТГУ. Авторами были непосредственно разработаны 5 виртуальных лабораторных практикумов:

- Компьютерная графика для географов.
- Цифровые модели рельефа.
- Работа с данными дистанционного зондирования в ГИС.
- Пространственный анализ в ГИС.
- Учебная географическая практика в окрестностях Томска и в Хакасии: инновационные технологии.

Поскольку такая форма учебников имеет очень большие возможности для анимации, в виртуальных практикумах широко используются функции трёхмерного моделирования и анимации программы ArcScene ArcGIS (ESRI Inc.). Например, в

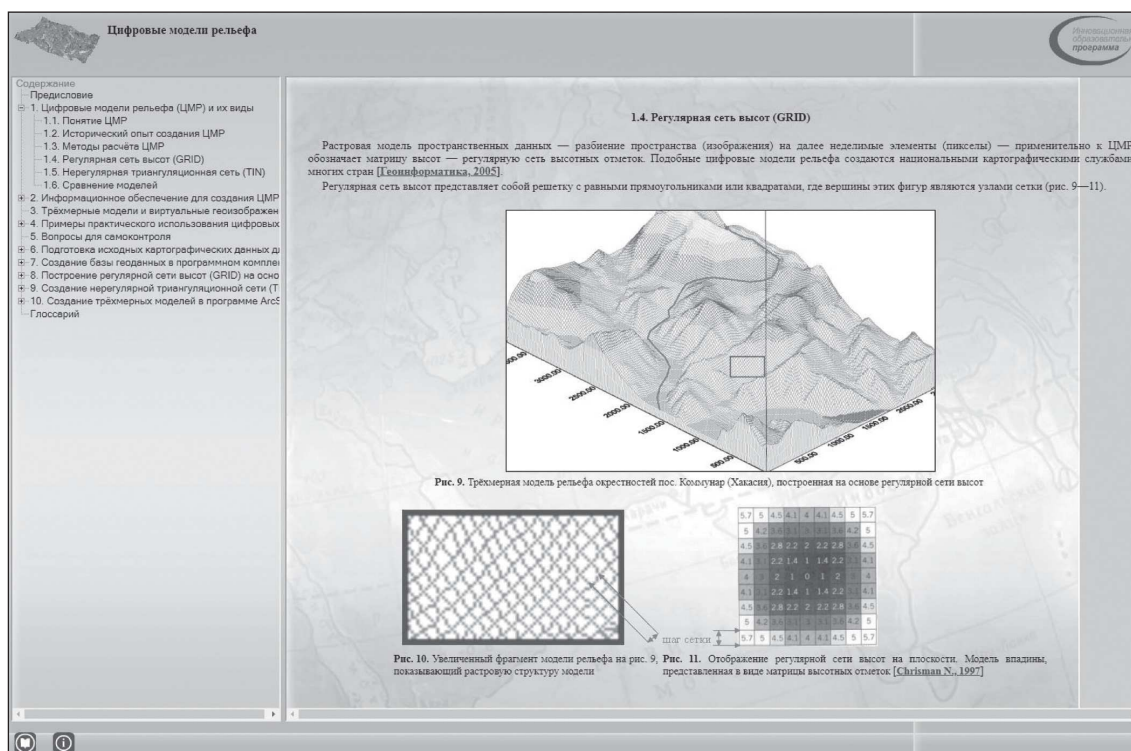


Рис. 2. Интерфейс учебно-методического комплекса «Цифровые модели рельефа»

курсе «Цифровые модели рельефа» использовано более 30 трёхмерных моделей и виртуальных геоизображений равнинных и горных территорий Томской области, Хакасии и Алтая (рис. 2), в том числе видеофайлы, демонстрирующие возможности ArcScene и Virtual GIS по драпировке моделей, вращению, приближению, анализу «зон видимости» и созданию виртуальных полётов по заданному маршруту (например, вдоль тела ледника Актру на Алтае).

В последнее время среди технологий e-learning большую популярность получили обучающие курсы на платформе Moodle. В 2014–2016 гг. авторами на этой платформе разработаны три курса: «Цифровые модели рельефа», «Технологии компьютерной обработки ДДЗ» и «Информационно-методические особенности оценки воздействия на окружающую среду в условиях Сибирского федерального округа России». Курсы включают в себя как теоретические блоки, состоящие из лекционных занятий (рис. 3), так и многочисленные лабораторные работы по освоению технологий цифрового моделирования рельефа и создания виртуальных геоизображений (рис. 4). Также в этих курсах раскрываются авторские методики сложного пространственного анализа на основе

ЦМР: например, расчёт эрозионной устойчивости ландшафтов путём вычисления средних уклонов геосистем и коэффициентов устойчивости, переклассификация растров морфометрических показателей для выявления высотных уровней долин рек и т.п.

Многие методики пространственного анализа с использованием ЦМР, вошедшие впоследствии в электронные образовательные ресурсы, были разработаны на кафедре географии ТГУ в процессе выполнения научно-исследовательских проектов, грантов и хозяйственных работ.

При создании нормативной документации экологического сопровождения проектов обустройства Чкаловского и Крапивинского нефтяных месторождений авторами была разработана методика оценки эрозионной устойчивости ландшафтов, суть которой заключается в расчёте цифровой модели рельефа в формате триангуляционной сети (TIN), конвертации TIN в растровую модель GRID и вычисления на основе GRID средних уклонов ландшафтов с помощью функции зональной статистики модуля ArcGIS Spatial Analyst. В результате была проведена интегральная оценка устойчивости ландшафтов районов обустройства нефтяных месторождений



Рис. 3. Страница лекционного занятия курса «Цифровые модели рельефа» на платформе Moodle

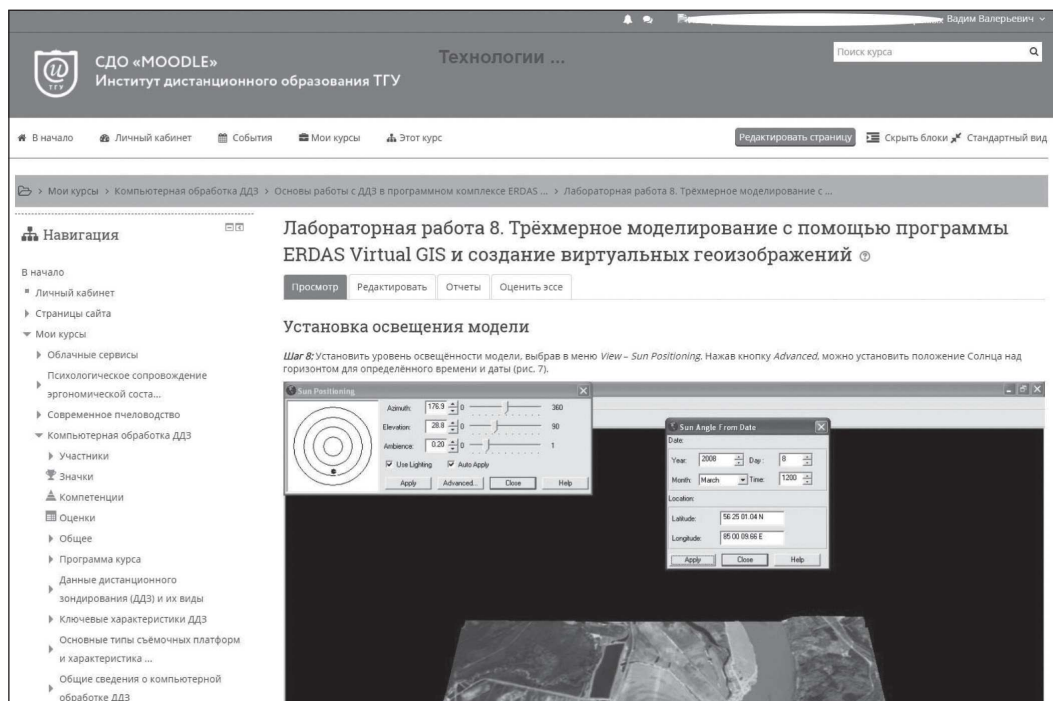


Рис. 4. Страница лабораторной работы курса «Компьютерная обработка ДДЗ» на платформе Moodle

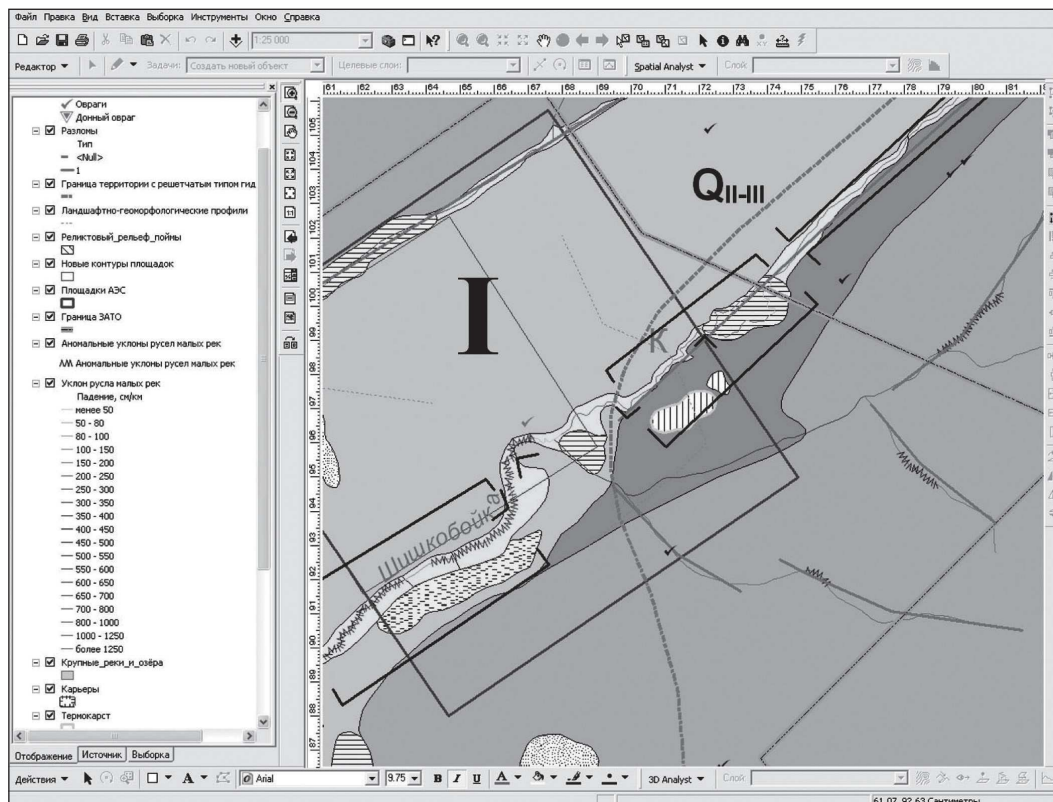


Рис. 5. Расчёт уклонов русел малых рек и прогнозирование разломов на основе ЦМР долины нижней Томи

к антропогенному воздействию и создана серия цифровых тематических карт, в том числе карты степени экологической опасности природопользования [6].

В 2008 г. при выполнении проекта «Геоморфологические условия территории и площадок размещения проектируемой Северной АЭС» [7] по заказу ФГУП «РОСЭНЕРГОАТОМ» крупномасштабная ЦМР долины нижней Томи была использована для поиска разрывных тектонических нарушений (геологических разломов) и оценки экологических рисков (рис. 5).

При выборе площадки для размещения АЭС с помощью ЦМР были рассчитаны уклоны русел малых рек. Участки с аномальными уклонами русел вкуче с нетипичным поведением самих русел («коленообразные» резкие повороты) помогли определить линии возможных тектонических нарушений.

На основе ЦМР долины р. Томи с помощью модуля ArcGIS Spatial Analyst нами рассчитана зональная статистика для ландшафтных систем

ранга урочищ по карте крутизны склонов и определён средний уклон каждого урочища, что позволило оценить степень дренированности геосистем и снизить субъективизм при характеристике рельефа в названии урочища. Так, урочища со средним уклоном менее $0,2^\circ$ были определены как плоские участки, $0,2-0,5^\circ$ – выровненные участки и более $0,5^\circ$ – пологонаклонные участки. Сделан вывод о лучшей дренированности геосистем верхнего участка долины (выше г. Томска), где средний уклон геосистем составил $0,92^\circ$ против $0,58^\circ$ у геосистем нижнего участка. Разновременные источники картографической информации также позволили оценить эрозионно-аккумулятивную деятельность р. Томи и выявить динамику ландшафтных систем речной долины [8].

Ещё один аспект использования ЦМР – оценка геоморфологических ресурсов для целей рекреации. Суть этой методики, разработанной авторами совместно с коллегами из Института водных и экологических проблем СО РАН, состоит в совмещении ландшафтной карты, карт климати-



Рис. 6. Идентификация объектов в зоне подтопления в модуле «Паводок» геопортала Томской области

ческого районирования, экспозиций и крутизны склонов, рассчитанных на основе ЦМР. Методика была апробирована на примере территории трансграничного Горного Алтая, где было выделено 25 природно-рекреационных районов [9].

В 2016 г. в ТГУ начата работа по созданию геопортала Томской области, в основе которого лежит I-GIS – высокопроизводительная геоинформационная система мониторинга и прогнозирования состояния природных объектов. Одно из наиболее востребованных приложений Геопортала – «Паводок», в котором с помощью технологий цифрового моделирования рельефа реализованы функции прогнозирования уровней подтопления вблизи населенных пунктов, а также трёхмерная визуализация этих участков. Первоначально эти функции были реализованы только для нескольких населённых пунктов в долине р. Томи, что было описано нами ранее [10]. В настоящее время созданы трёхмерные модели рельефа и на отдельные участки долины р. Оби (Победа–Мельниково, Колпашево). Также создана обширная база гео-

данных по населённым пунктам и домам в зонах подтопления и с помощью программы ArcScene комплекса ArcGIS (ESRI Inc.) реализована идентификация объектов в зоне подтопления – например, домов и их домовладельцев (рис. 6), что очень актуально для предупреждения службами ГО ЧС жителей во время паводка.

Следует отметить, что созданные цифровые модели рельефа речных долин р. Томи и Оби не являются статичными, а постоянно корректируются на основе новых данных. Если первоначально для создания моделей использовались высотные данные с оцифрованных топографических планов и карт масштабов 1:5 000 – 1:25 000, то в настоящее время нами разработана технология создания ЦМР из облака точек по результатам съёмки с БПЛА (рис. 7). Такой подход позволяет актуализировать информацию о рельефе, однако является также достаточно трудоёмким, так как требуется «маскирование» объектов (домов, деревьев) для получения именно модели рельефа, а не поверхности.

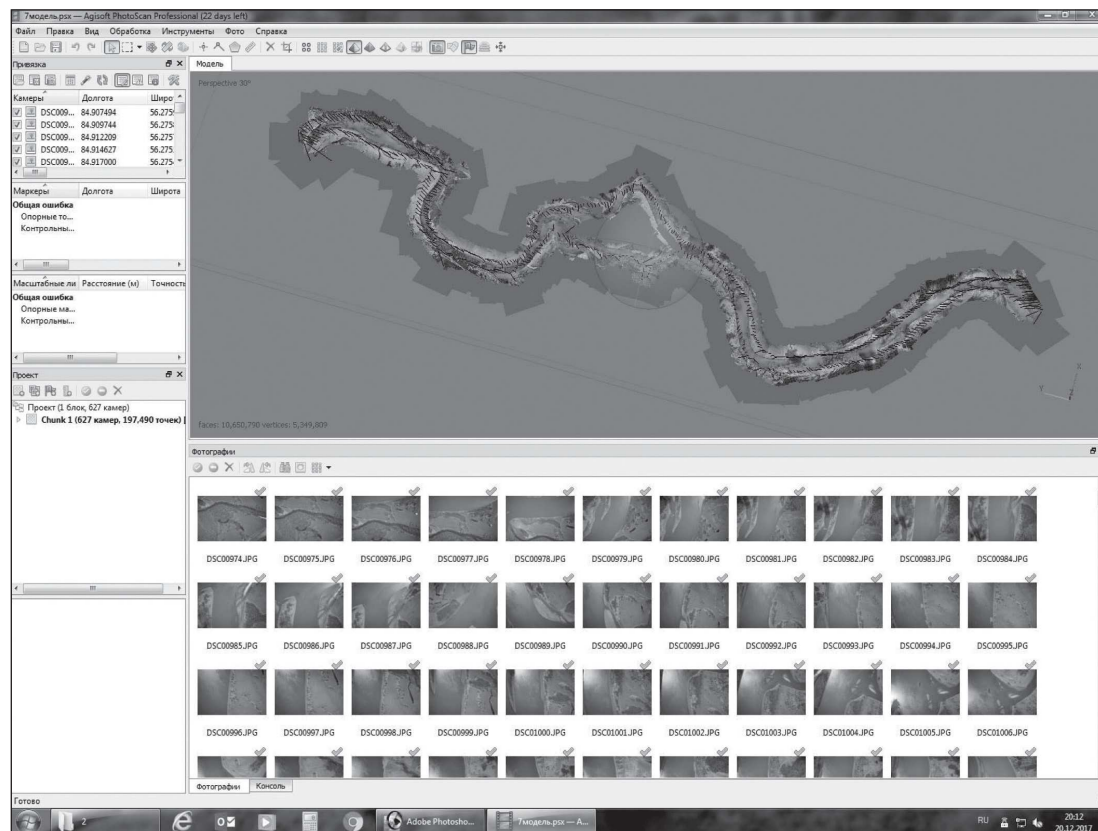


Рис. 7. Создание ортофотоплана по результатам съёмок с БПЛА долины р. Томи в программе Agisoft PhotoScan

В качестве перспективных научных разработок с использованием ЦМР, на наш взгляд, следует отметить объединение ландшафтных баз геоданных с моделями рельефа для создания сплошных «ландшафтных геополей», что позволит вывести на новый уровень ландшафтно-экологический мониторинг с использованием полностью автоматизированной обработки ДДЗ, в том числе методами нейросетевого анализа и BIG DATA. Такой подход хорошо согласуется с активно разрабатываемыми в последнее время зарубежными географами методиками создания «ландшафтно-градиентных» моделей с одновременным привлечением морфометрических индексов рельефа, рассчитанных по ЦМР, и вегетационных индексов, рассчитанных по космическим снимкам [11]. На базе параметров и индексов каждой ячейки такой модели можно определять сложные интегральные показатели различных территорий для решения прикладных задач с использованием технологий «дерева принятия решений», описанных в трудах французских [12] и японских географов [13].

В целом, анализируя 20-летний опыт реализации научных и образовательных проектов с использованием технологий цифрового моделирования рельефа географами ТГУ, можно сделать ряд выводов: технологии ЦМР являются одними из самых перспективных и «прорывных» технологий анализа в ГИС и безусловно востребованы обществом; непрерывный подход к обучению с помощью цепочки взаимосвязанных курсов полностью оправдал себя; использование учебных ГИС существенно облегчает освоение технологий ЦМР; высоко востребованы работодателями умения студентов создавать цифровые модели рельефа «с нуля», т.е. с бумажной карты или по результатам съёмок с БПЛА; электронные учебники и курсы на платформе Moodle отлично дополняют аудиторные занятия и поощряют студентов к самостоятельной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новаковский Б.А., Прасолов С.В., Прасолова А.И. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей. – М.: Научный мир, 2003. – 64 с.
2. Геоинформатика / под ред. В.С. Тикунова. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 480 с.
3. Сербенюк С.Н., Кошель С.М., Мусин О.Р. Программы МАГ для создания цифровых моделей геополей // Геодезия и картография. – 1991. – № 4. – С. 44–46.
4. Хромых В.В. Учебная геоинформационная система «Июс» для студентов-географов специализации «краеведение и туризм» // Вопросы географии Сибири. – Вып. 22. – Томск, 1997. – С. 161–167.
5. Хромых В.В. Учебные ГИС «Июс» и «Актру»: цифровые модели рельефа // ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий: материалы международной конференции InterCarto-4. – Барнаул, 1998. – С. 634–637.
6. Хромых В.В. ГИС экологического сопровождения инвестиционно-строительных проектов в нефтегазовой отрасли // ArcReview. – 2002. – № 1. – С. 19–20.
7. Геоморфологические условия территории и площадок размещения проектируемой Северной АЭС: Отчёт о результатах работ, проведённых в 2008 г. по заказу ООО «КузбассГИСИЗ» и ФГУП «РОСЭНЕРГОАТОМ». – Томск, 2008. – 74 с.
8. Хромых В.В., Хромых О.В. Использование ГИС-технологий для изучения динамики долинных ландшафтов (на примере долины нижней Томи) // Вестник Томского государственного университета. – 2007. – № 300-1. – С. 230–233.
9. Гармс Е.О., Хромых В.В., Сухова М.Г. Использование ГИС в оценке геоморфологических ресурсов для целей рекреации (на примере трансграничного Горного Алтая) // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 940.
10. Демкин В.П., Хромых В.В., Березин А.Е. и др. Высокопроизводительная геоинформационная система мониторинга и прогнозирования состояния природных объектов для решения научно-технических и образовательных задач // Открытое и дистанционное образование. – 2016. – № 4 (64). – С. 5–11.
11. McGarigal K., Tagil S., Cushman S.A. Surface metrics: an alternative to patch metrics for the quantification of landscape structure // Landscape Ecology. – 2009. – Vol. 24. – P. 433–450.
12. Li X., Claramunt C. A Spatial Entropy-Based Decision Tree for Classification of Geographical Information // Transactions in GIS. – 2006. – Vol. 10 (3). – P. 451–467.
13. Saito H., Nakayama D., Matsuyama H. Comparison of landslide susceptibility based on a decision-tree model and actual landslide occurrence: The Akaishi Mountains, Japan // Geomorphology. – 2009. – Vol. 109. – P. 108–121.

Khromykh V.V., Khromykh O.V.

National Research Tomsk State University,
Tomsk, Russia

DIGITAL ELEVATION MODELING IN RESEARCH AND EDUCATIONAL PROJECTS (E-LEARNING TECHNOLOGIES)

Keywords: geographic information system, GIS, digital elevation model, distance learning, electronic educational resource, geoportal, monitoring, environment.

In Tomsk State University, at the Department of Geography, digital elevation modeling technologies began to be introduced into research and educational activities in the late 1990s. A conceptual scheme for teaching GIS-technologies was introduced in the educational process. New courses were developed:

“Computer graphics”, “Geographic information systems”, “Desktop mapping systems”, “Building geodatabases”, “Digital elevation models”. The main principle of GIS education at the Department of Geography of TSU was the continuity of training, i.e. the training courses were designed so that training in GIS-technologies was carried out from simple to difficult in each semester without significant breaks, which allowed students not to “forget” and not lose the acquired skills and competencies. The course “Digital elevation models” is one of the most difficult for mastering, therefore it is taught in the sixth semester and it occupies one of the last places in this chain of courses. Since 2003, the course “Computer processing of remote sensing data” is taught, within the framework of which for the first time in TSU there were began to teach technologies of 3D modeling and creation of virtual geoimages on the basis of DEM, draped with space images. Since 2007, new forms of distance learning have been actively introduced - virtual laboratory workshops, which are electronic educational and methodological complexes, including a large block of practical exercises created in a step-by-step mode using multimedia animation technologies. They are available on the Internet on the website of the Institute of Distance Education of TSU. 5 virtual laboratory workshops were developed by the authors. In 2014-2016 years, authors developed three courses on the Moodle platform: “Digital Elevation Models”, “Computer Processing technologies of remote sensing data”, and “Information and Methodological Features of Environmental Impact Assessment in the Siberian Federal District of Russia”. The courses include both theoretical blocks consisting of lecture classes, as well as numerous laboratory works on mastering the technologies of digital elevation modeling and creation of virtual geoimages. Many methods of spatial analysis using DEM, later included in electronic educational resources, were developed at the Department of Geography of TSU during the implementation of research projects and grants. For example, when choosing a site to accommodate the Seversk Nuclear Power Plant, the slopes of small river channels were analyzed with the use of a digital elevation model in order to search

for tectonic faults (geological faults). At present, the methods for forecasting the levels of flooding of populated areas in the valleys of the Tom and Ob rivers developed on the basis of three-dimensional elevation modeling are of great importance and prospects for the Geoportal of the Tomsk region.

REFERENCES

1. Novakovskij B.A., Prasolov S.V., Prasolova A.I. Cifrovye modeli rel'efa real'nyh i abstraktnykh geopolej. – M.: Nauchnyj mir, 2003. – 64 s.
2. *Geoinformatika* / pod red. V.S. Tikunova. – M.: Izd. centr «Akademija», 2005. – 480 s.
3. Serbenjuk S.N., Koshelev S.M., Musin O.R. Programmy MAG dlja sozdaniya cifrovyykh modelej geopolej // *Geodezija i kartografija*. – 1991. – № 4. – S. 44–46.
4. Hromykh V.V. Uchebnaja geoinformacionnaja sistema «Ijus» dlja studentov-geografov specializacii «kraevedenie i turizm» // *Voprosy geografii Sibiri*. – Vyp. 22. – Tomsk, 1997. – S. 161–167.
5. Hromykh V.V. Uchebnye GIS «Ijus» i «Aktru»: cifrovye modeli rel'efa // GIS dlja optimizacii prirodnopol'zovanija v celjah ustojchivogo razvitiya territorij: materialy mezhdunarodnoj konferencii InterCarto-4. – Barnaul, 1998. – S. 634–637.
6. Hromykh V.V. GIS jekologicheskogo soprovozhdenija investicionno-stroitel'nykh proektov v neftegazovoj otrasli // *ArcReview*. – 2002. – № 1. – S. 19–20.
7. *Geomorfologicheskie uslovija territorii i ploshhadok razmeshhenija proektiruemoj Severskoj AJeS: Otchjot o rezul'tatah rabot, provedjonnyh v 2008 g. po zakazu OOO «KuzbassTISIZ» i FGUP «ROSJeNERGOATOM»*. – Tomsk, 2008. – 74 s.
8. Hromykh V.V., Hromykh O.V. Ispol'zovanie GIS-tehnologii dlja izuchenija dinamiki dolinnyh landshaftov (na primere doliny nizhnej Tomi) // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. – 2007. – № 300-1. – S. 230–233.
9. Garms E.O., Hromykh V.V., Suhova M.G. Ispol'zovanie GIS v ocenke geomorfologicheskikh resursov dlja celej rekreacii (na primere transgranichnogo Gornogo Altaja) // *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. – 2013. – № 6. – S. 940.
10. Demkin V.P., Hromykh V.V., Berezin A.E. i dr. Vysokoproizvoditel'naja geoinformacionnaja sistema monitoringa i prognozirovaniya sostojanija prirodnnykh ob'ektov dlja reshenija nauchno-tehnicheskikh i obrazovatel'nykh zadach // *Otkrytoe i distancionnoe obrazovanie*. – 2016. – № 4 (64). – S. 5–11.
11. McGarigal K., Tagil S., Cushman S.A. Surface metrics: an alternative to patch metrics for the quantification of landscape structure // *Landscape Ecology*. – 2009. – Vol. 24. – P. 433–450.
12. Li X., Claramunt C.A. Spatial Entropy-Based Decision Tree for Classification of Geographical Information // *Transactions in GIS*. – 2006. – Vol. 10 (3). – P. 451–467.
13. Saito H., Nakayama D., Matsuyama H. Comparison of landslide susceptibility based on a decision-tree model and actual landslide occurrence: The Akaishi Mountains, Japan // *Geomorphology*. – 2009. – Vol. 109. – P. 108–121.