

александрийского межледникового (11-я изотопная стадия), а моложе его. В свете новых представлений о стратиграфии гляциоплейстоцена региона таковыми могут быть для данной территории смоленская или шкловская межледниковые эпохи [3].

Анализ изотопно-кислородных шкал Северного полушария планеты показал, что смоленский межледниковый этап развития природной среды (9-я изотопная стадия) менее сложен в палеогеографическом аспекте (один основной климатический оптимум с ярко выраженной фазой граба, реже – два, из которых второй – в ранге потепления) по сравнению со шкловским (7-й изотопный ярус: три оптимума с разделяющими их похолоданиями). Скорее всего, в разрезе Николаево отражены этапы осадконакопления и растительности шкловского межледникового, формировавшегося вслед за садкой днепровской морены и предшествовавшего образованию средней (сожской) морены, представленной двумя слоями (стадиями (?)).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Korybut-Daszkiewicz A., Masurek K.* Występowanie węgla brunatnego pod Mikolajewem nad Niemnem // *Badania petrograficzne na Wileńszczyźnie. Biuletyn 13.* Warszawa, 1939.
2. *Якубовская Т. В.* Ископаемая флора д. Николаево на Немане // Проблемы геохимического и геофизического изучения земной коры. Минск, 1974. С. 180–184.
3. *Еловичева Я. К.* Эволюция природной среды антропогена Беларуси. Минск, 2001.

Поступила в редакцию 04.02.2015.

Ядвига Казимировна Еловичева – доктор географических наук, доцент, заведующая кафедрой физической географии мира и образовательных технологий географического факультета БГУ.

УДК 911.2:551.4(476)(043.3)+91:004(043.3)

Д. М. КУРЛОВИЧ, М. А. БАРКОВЕЦ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЛИНЕАМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА БЕЛАРУСИ

Разработана и апробирована для территории Беларуси методика автоматизированного линеаментного анализа рельефа в среде географических информационных систем (ГИС) Geomatica и ArcGIS. Линеаментное поле прокоррелировано (по плотности и ориентировки) с разломами кристаллического фундамента, а также с основными физическими полями Земли. Выявлены закономерности пространственного размещения и ориентировки линеаментов и разломов кристаллического фундамента, проявления линеаментов в магнитном и гравитационном полях. Основные результаты работы могут выступать в качестве критерия при выборе мест для строительства особо важных народно-хозяйственных объектов, поиске и разведке месторождений полезных ископаемых, их эксплуатации.

Ключевые слова: ГИС; линеаменты; рельеф; разломы кристаллического фундамента.

In the article an original method of automated lineament analysis is described. It is based on using of GIS-technologies (Geomatica and ArcGIS) and correlation analysis. An automated identification lineament analysis of landforms in the Republic of Belarus was performed. The resulting layer of lineaments was correlated with the crystalline basement faults, as well as the basic physical fields of the Earth. As result of the research, maps of density, orientation and correlation have been made. Some patterns in the spatial distribution and orientation of lineaments and faults of the crystalline basement, the manifestations of lineaments in the magnetic and gravitational fields were found.

Key words: GIS; lineaments; landforms; the crystalline basement faults.

Линеаментный анализ представляет собой эффективный комплекс геоморфологических, геологических, дистанционных и других методов картирования и мониторинга потенциально опасных геолого-геоморфологических объектов линейного характера. Выявленные в результате исследований линейные структуры могут использоваться для решения ряда прикладных задач, таких, например, как определение путей миграции подземных вод, поиск месторождений полезных ископаемых, оценка стабильности блоков геологической среды при проектировании и строительстве сооружений военного, гражданского и промышленного назначения и др. [1–5].

Идентификация линеаментов на земной поверхности может выполняться визуальным или автоматизированным способом. Традиционно линеаменты выделяются визуальным способом по топографическим картам (тополинеаменты) и данным дистанционного зондирования (космолинеаменты). Следует отметить, что этот процесс довольно трудоемкий. Одним из направлений оптимизации его может служить применение автоматизированного линеаментного анализа в среде современных ГИС. Данный вид анализа обладает высокой оперативностью выполнения и значительной экономической эффективностью.

В настоящем исследовании разработана и апробирована методика автоматизированного линеаментного анализа. В качестве исходных данных использовались свободные для доступа и бесплатные для

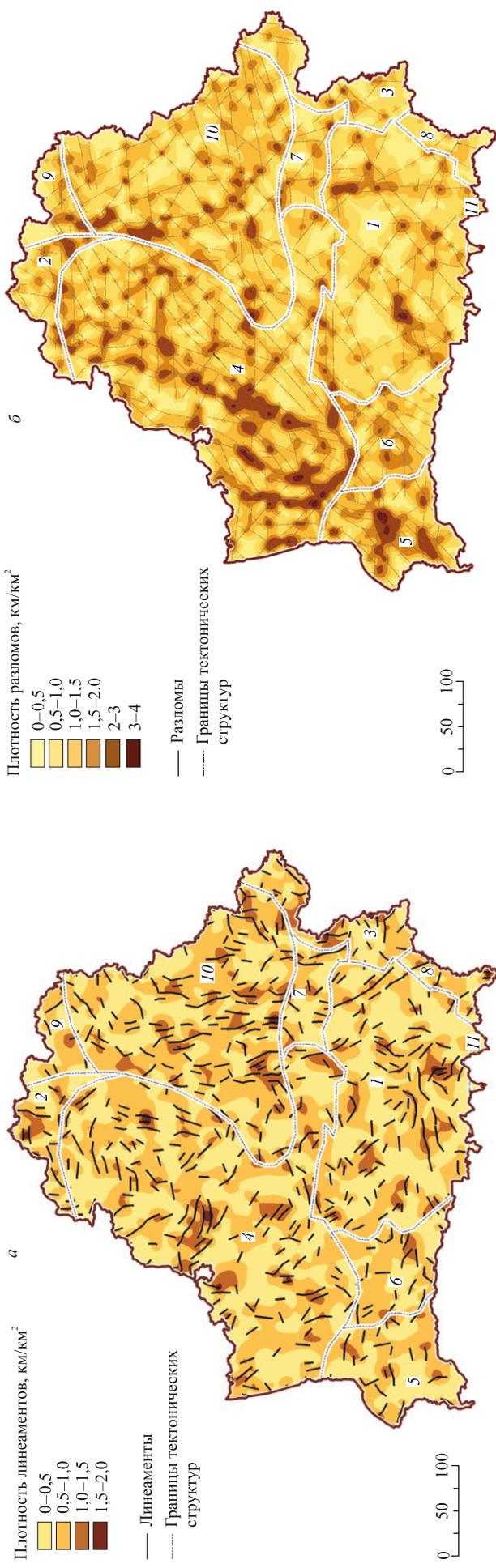


Рис. 1. Плотность линейментов рельефа (а) и разломов кристаллического фундамента (б). Цифрами на картах (здесь и на рис. 2, 4) обозначены тектонические структуры первого порядка: 1 – Припятский прогиб; 2 – Латвийская седловина; 3 – Воронежская антеклиза; 4 – Белорусская антеклиза; 5 – Подляско-Брестская впадина; 6 – Полесская седловина; 7 – Жлобинская седловина; 8 – Брагинско-Лоевская седловина; 9 – Велижская седловина; 10 – Оршанская впадина; 11 – Украинский щит. Границы тектонических структур и разломы даны по [9–12]

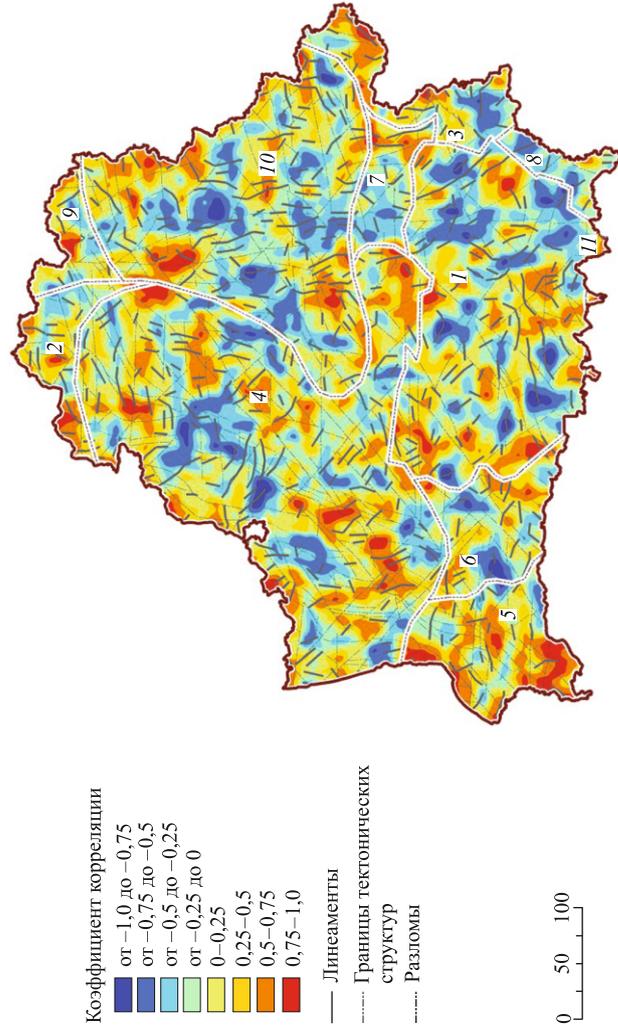
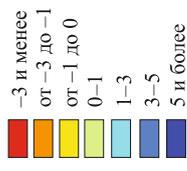


Рис. 2. Корреляция полей плотности линейментов и разломов фундамента

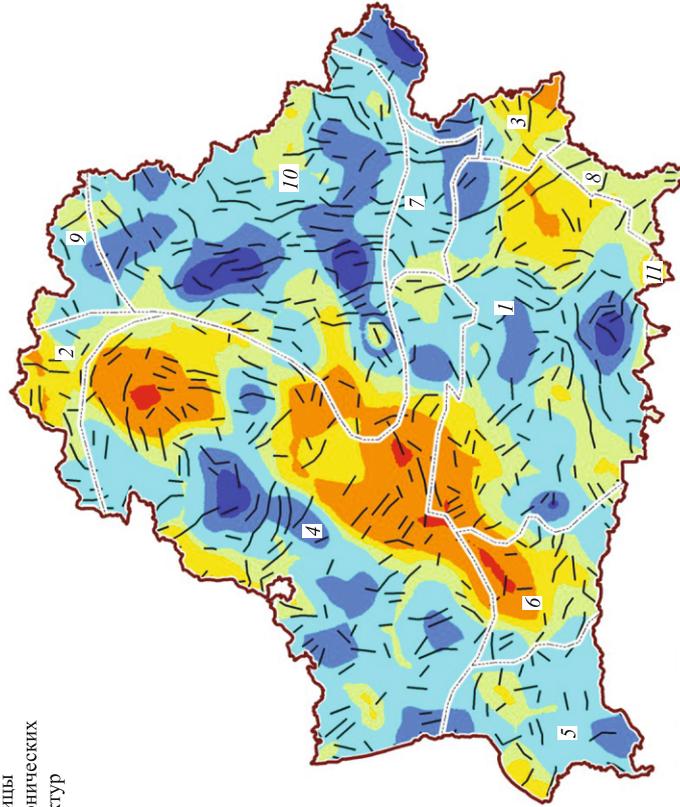
а

Интенсивность магнитного поля (10^3 нТл)



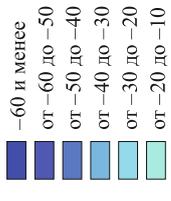
— Линеаменты

----- Границы
тектонических
структур



б

Интенсивность гравитационного поля (10 мГал)



— Линеаменты

----- Границы
тектонических
структур

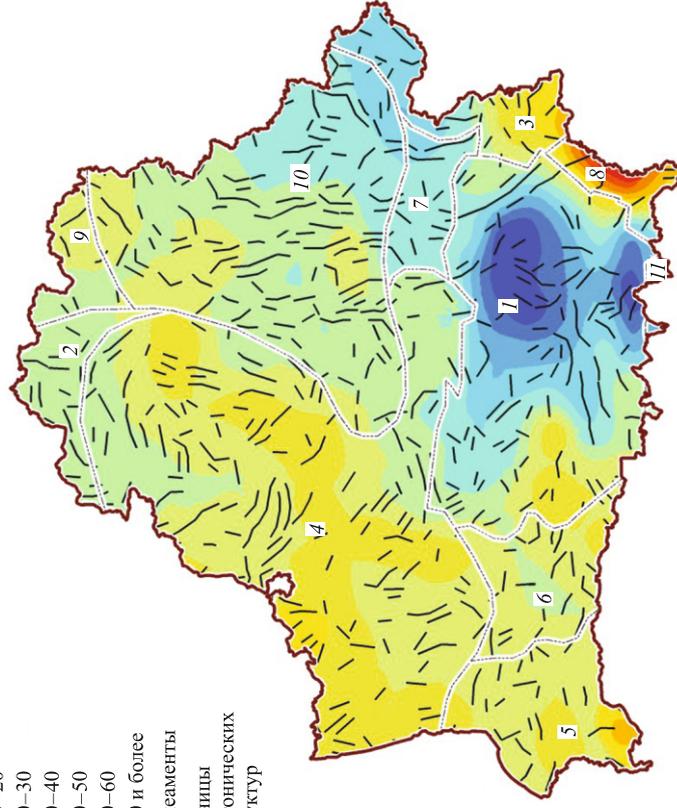


Рис. 4. Карта линеаментов в полях магнитных (а) и гравитационных (б) аномалий. Поля по [11–12]

получения материалы радарной топографической съемки (shuttle radar topographic mission, SRTM) первого уровня. Оценка точности матрицы SRTM показала, что она соответствует топографической карте масштаба 1 : 100 000 [6]. Базовым программным обеспечением анализа служила тестовая версия (15-day trial version) ГИС Geomatica (PCI Geomatics, Канада).

Цифровая SRTM-модель рельефа Беларуси была импортирована в среду ГИС Geomatica в форме растра, представленного полем абсолютных отметок рельефа в виде значений шкалы оттенков серого (256 градаций). Для идентификации в автоматическом режиме линеаментов был использован модуль растрового ГИС-анализа – LINE [7]. Алгоритм работы модуля включает три этапа.

На *первом этапе* по полю абсолютных отметок рельефа в пределах заданного пользователем радиуса поиска по алгоритму Кэнни (Canny edge detector) [8] выделялись линейно ориентированные элементы, представляющие собой цепь вытянутых в пространстве пикселей растра близких по значениям абсолютных высот и резко выделяющихся среди окружающих. При этом варьирование радиуса поиска позволяло обособленно выявлять линеаменты локального, регионального и суперрегионального характера.

На *втором этапе* линейно ориентированные цепочки пикселей растра SRTM, выделяющиеся по абсолютным высотам среди окружающих, конвертировались в отдельный битовый (черно-белый) растр (черный цвет – линеаменты, белый – остальные пиксели).

На *третьем этапе* битовый растр (черная цветовая составляющая) конвертировался в линейный векторный слой, отражающий линейно ориентированные элементы топографии: прямолинейные элементы гидрографии, овражно-балочной сети, береговой линии озер, форм микро- и мезорельефа. Результат автоматизированной идентификации линеаментов регионального и суперрегионального характера представлен на рис. 1, а (см. цв. вклейку).

Кроме непосредственной идентификации и выделения было выполнено исследование пространственной дифференциации и ориентировки линеаментов регионального и суперрегионального характера, а также сравнение их с сетью установленных геологическими, геофизическими и другими методами разломов кристаллического фундамента и осадочного чехла [9–12]. Анализ пространственной дифференциации линеаментов и разломов выполнялся путем расчета грид-моделей их плотности (см. цв. вклейку, рис. 1, б) в ГИС ArcGIS (размер ячейки грида – 1 км), куда предварительно был импортирован векторный слой линеаментов. В данном программном продукте выполнена векторизация разломов.

Следует отметить, что линеаменты регионального и суперрегионального характера довольно равномерно распределены по территории Беларуси. Преобладающим значением плотности является интервал 2–3 км/км². Чаще всего наибольшая концентрация линеаментов присуща объектам гидрографии. Так, на отдельных спрямленных участках рек Западная Двина, Дисна, Днепр, Сож, Березина, Друть, Припять и Неман плотность их может достигать 4,0–4,5 км/км². Значительно поле линеаментов в пределах Ошмянской, Минской, Новогрудской, Копыльской, Волковысской, Гродненской, Городокской, Витебской, Оршанской и Браславской возвышенностей, Освейской и Свенцянских гряд.

Для выявления связей между разломами фундамента и линеаменами современного рельефа в среде ГИС ArcGIS (набор инструментов Topography Toolbox) был проведен корреляционный анализ грид-поверхностей плотности разломов и плотности линеаментов (см. цв. вклейку, рис. 2). По результатам исследований установлено, что довольно часто участкам с наиболее пересеченным линеаментным полем соответствуют площади с повышенной плотностью разломов. Кроме того, можно отметить практически полное соответствие линеаментов и Ошмянского и Симоновичского разломов, взаимное соотношение линеаментов и отдельных фрагментов Налибокского, Северо-Припятского, Берестовицкого, Ореховского, Горынского, Василевичского, Тетеревского, Стоховско-Могилевского, Чашникского, Глубокского, Бешенковичского, Витебского, Кореличского, Щучинского, Белостокского, Скидельского, Дятловского разломов, а также разломов Полоцкой и Каменецкой зон.

Исследование ориентировки линеаментов и разломов кристаллического фундамента осуществлялось также автоматическим способом. Для этого рассчитывался азимут простираения каждого линейного вектора. Данная операция проводилась в ГИС ArcGIS с помощью инструмента Graphics and Shapes. Визуализация итоговых данных выполнялась в виде роз-диаграмм с помощью программного продукта Grapher 8 (компания Golden Software, Inc.) (рис. 3). На общей розе-диаграмме отмечается четкое соответствие ориентировки и количества линеаментов и разломов. Максимумы приходятся на интервалы 270–275°, 320–310°, 0–5°, 40–45°, 85–90°.

Определенный интерес представляет отражение линеаментов в геофизических полях. Сопоставление векторного слоя выделенных линеаментов и изодинам аномалий магнитного поля (см. цв. вклейку, рис. 4, а) показывает, что их направления часто совпадают. Совпадения направлений характерны в основном для северной и северо-восточной частей страны – для Оршанской впадины, северной части Белорусской антеклизы, Латвийской седловины. В западной и южной частях Беларуси направления

линеаментов и изодинам часто пересекаются. Кроме того, на площади Оршанской впадины, Припятского прогиба, Белорусской антеклизы наблюдается увеличение плотности линеаментов и их длин на участках с наибольшей интенсивностью магнитного поля. Следует отметить, что на участках с незначительными вариациями изодинам сформировались зоны разреживания или отсутствия линеаментов.

Различно проявляются линеаменты в аномалиях гравитационного поля (см. цв. вклейку, рис. 4, б). На территории Оршанской впадины, Велижской седловины, Жлобинской седловины, Воронежской антеклизы наблюдается совпадение направления линеаментов с направлением изоаномал. Следует также отметить, что для всей территории Беларуси характерно увеличение плотности линеаментов с уменьшением значений интенсивности гравитационного поля.

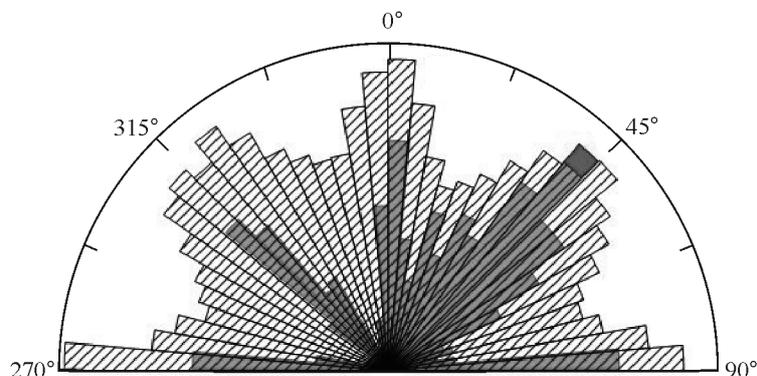


Рис. 3. Роза-диаграмма ориентировки линеаментов и разломов фундамента:
 ▨ – линеаменты рельефа; ■ – разломы кристаллического фундамента

Основными результатами исследования являются разработка и апробация методики автоматизированного линеamentного анализа рельефа Беларуси с применением современных ГИС и выявление закономерности распределения и ориентировки линеamentов регионального и суперрегионального характера.

Проведенный анализ взаимного расположения и ориентировки линеamentов и разломов Беларуси показал, что они только частично совпадают друг с другом. Природа выявленных взаимосвязей, к сожалению, до настоящего момента остается досконально неизученной.

В рамках дальнейших исследований предполагается определение линейных элементов структурных поверхностей, отражающих строение основных этажей осадочного чехла, а также поиск корреляционных связей в рамках системы «кристаллический фундамент – осадочный чехол – современный рельеф».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нечипоренко Л. А., Вольская Л. С. Линеamentная сеть как индикатор глубинного строения территории Белоруссии // Эффективность аэрокосмических методов в изучении недр Белоруссии и охране геологической среды : сб. ст. Минск, 1988. С. 22–25.
2. Матвеев А. В., Нечипоренко Л. А. Особенности тополинеamentов на территории Беларуси // Литосфера. 1995. № 3. С. 127–134.
3. Матвеев А. В., Нечипоренко Л. А. Районирование территории Беларуси по особенностям распространения линеamentов, выявленных по космическим снимкам и топокартам // Докл. НАН Беларуси. 1999. Т. 43, № 3. С. 111–114.
4. Матвеев А. В., Нечипоренко Л. А. Линеamentы территории Беларуси. Минск, 2001.
5. Губин В. Н., Ковалев А. А. Космическая геология Беларуси. Минск, 2008.
6. Карионов Ю. И. Оценка точности матрицы высот SRTM // Геопрофи. 2010. № 1. С. 48–51.
7. PCI Geomatica user's guide version 10.1. Ontario, 2007.
8. Sanny J. A Computational Approach To Edge Detection, IEEE Trans // Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. Vol. 8 (ISS 6). P. 679–698.
9. Разломы земной коры Беларуси / Р. Е. Айзберг [и др.] ; под ред. Р. Е. Айзберга. Минск, 2007.
10. Разломы консолидированной литосферы Беларуси по геофизическим данным / Р. Г. Гарецкий [и др.] // Литосфера. 2005. № 2 (23). С. 59–70.
11. Геология Беларуси / А. С. Махнач [и др.] ; под ред. А. С. Махнач [и др.]. Минск, 2001.
12. Нацыянальны атлас Беларусі / пад рэд. М. У. Мясніковіча ; Камітэт па зямельных рэсурсах, геадэзіі і картаграфіі пры Савеце Міністраў Рэспублікі Беларусь. Мінск, 2002.

Поступила в редакцию 25.02.2015.

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

Марина Александровна Барковец – студентка 5-го курса географического факультета БГУ. Научный руководитель – Д. М. Курлович.