УДК 550.814, 004.9

МОНИТОРИНГ РЕЛЬЕФООБРАЗУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОТОГРАММЕТРИИ И ГИС

© 2010 И.Ю. Чернова, И.И. Нугманов, А.Н. Даутов, П.С. Крылов

Казанский государственный университет

Поступила в редакцию 10.05.2010

Целью исследований являлась разработка элементов методики извлечения информации о рельефообразующих процессах из архивных и современных данных дистанционного зондирования (ДЗ) с использованием новейших технологий обработки данных ДЗ, в том числе фотограмметрии и ГИС. Показана высокая информативность и экономическая выгода предложенных элементов методики. Показано, что результаты выполненного мониторингового исследования могут быть использованы при решении широкого круга прикладных задач.

Ключевые слова: *мониторинг, эрозионные процессы, геодинамика, фотограмметрия, ГИС*

В последнее десятилетие мониторинг рельефообразующих процессов является одним из самых динамично развивающихся направлений исследований, связанных с изучением изменчивости окружающей среды. Быстрое развитие данного направления обусловлено появлением новых источников данных ДЗ и новых технологий обработки пространственных данных. Другая причина состоит в том, что мониторинг изменения форм рельефа, эрозионных, карстовых, оползневых и других ландшафтообразующих процессов является необходимым условием успешного решения задач долгосрочного планирования и обеспечения устойчивого развития густонаселенных регионов с развитой аграрной и/или промышленной инфраструктурами. Известны успешные проекты по мониторингу состояния земной поверхности на территориях крупных месторождений нефти (по данным радиолокационной съемки) [5], по выявлению зон активных вертикальных движений в пределах урбанизированных территорий (по данным повторного нивелирования) [4], по выявлению процессов разрушения техногенных объектов и ландшафтов (по результатам воздушного и наземного лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки) [8] и др. Перечисленные проекты использовали данные и методики, предназначенные для изучения быстротечных процессов, исчисляемых годами и месяцами. Между тем архивные данные (аэрофото- и космоснимки) прошлого века мы можем ныне рассматривать как весьма ценный материал, позволяющий нам проводить сравнения и изучать тенденции развития рельефа за более длительные периоды времени, использовать рельеф дневной поверхности и связанные с ним ландшафты в качестве комплексных и весьма чувствительных индикаторов проявлений современной геодинамики.

Для авторов наибольший интерес представляет возможность исследования проявлений современной геодинамики в пределах нефтегазоносных регионов. Перед нами стоит задача изучения влияния геодинамических процессов и связанных с ними неотектонических проявлений на образование скоплений углеводородов и их устойчивость во времени, что является проблемой практически неизученной.Но в процессе изучения материала и разработки методики выявления и анализа рельефообразующих процессов обнаружилось, что предложенный подход к изучению архивных данных может быть использован при решении широкого круга практических задач и научных проблем.

Выбор объекта исследования и рабочего материала. В качестве объекта исследования была выбрана территория Черемшанского района Республики Татарстан (РТ). Территория с весьма развитой аграрной инфраструктурой, с интенсивной добычей нефти. С точки зрения изучения современной геодинамики данная территория является привлекательным объектом, т.к. находится на границе двух активных неотектонических структур I порядка – Южно-Татарского свода и Мелекесской впадины. Разнообразные формы рельефа, наличие крупных рек и множества мелких водотоков дают основание предполагать, что искомые проявления современной геодинамики будут обнаружены, а современные формы рельефа имеют неотектоническое происхождение. На выбор территории исследования также повлияло наличие достаточного количества исходного материала. В проекте были использованы данные аэрофото-

Чернова Инна Юрьевна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики. E-mail: inna.chernova@ksu.ru
Нугманов Ильмир Искандарович, аспирант. E-mail:nusmumrik@gmail.com
Даутов Айрат Наильевич, аспирант. E-mail: dizel07@yandex.ru
Крылов Павел Сергеевич, студент. E-mail: strint@front.ru

съемки территории РТ 1953 г. (масштаб съемки 1:17000, высота полета 1100 м), данные аэрофотосъемки 1980 г. (масштаб съемки 1:50000, высота полета 7000 м), а также данные съемки 2008 г. со спутника WorldView (панхроматический диапазон съемки, пространственное разрешение 60 см). Для построения цифровых моделей рельефа (ЦМР) использовались планшеты топографических карт масштаба 1:25000. Все архивные данные были предоставлены спецфондом КГУ. В качестве программного обеспечения проекта были выбраны программа-векторизатор Easy Trace Pro 8.7 (Easy Trace Group, Россия), географическая информационная система ArcGIS 9.3.1 (ESRI,США), программа обработки данных дистанционного зондирования ERDAS Imagine 9.3.2 (ERDAS,США) и цифровая фотограмметрическая станция LPS 9.3 (ERDAS, США).

Предварительная обработка данных. Предварительная обработка данных включала сбор и первичную подготовку картографического материала, включая географическую привязку данных, оцифровку бумажных оригиналов топографических карт, взаимную увязку разномасштабных векторных и растровых данных, создание мозаики космоснимков WordView, создание единой базы геоданных на основе ArcGIS. В итоге был подготовлен геоинформационный проект, в рамках которого в дальнейшем выполнялась интеграция и окончательный анализ всех выходных данных. Основной объем работ выполнялся в программных модулях ERDAS Imagine. На территорию Черемшанского района РТ нам удалось собрать внушительный архив аэрофотоснимков: около 1000 снимков масштаба 1:17000 (1953 г. съемки) и более 60 снимков масштаба 1:50000 (1980 г. съемки). Попытка массовой обработки данных без предварительной оценки пригодности и информативности архивных материалов может оказаться пустой тратой времени и в итоге не иметь смысла. Кроме того, формирование архива в цифровом виде (сканирование бумажных фотографий и их систематизация) в настоящее время еще не закончено. Поэтому на начальном этапе исследований было выбрано 2 близко расположенных участка с разными типами ландшафта (рис. 1) для тестирования архивного материала и выбранного программного обеспечения. На этом же этапе исследований предполагалось наметить основные подходы к разработке способов обнаружения изменений ландшафта и элементов дневного рельефа вследствие усиления или затухания интенсивности геодинамических процессов.

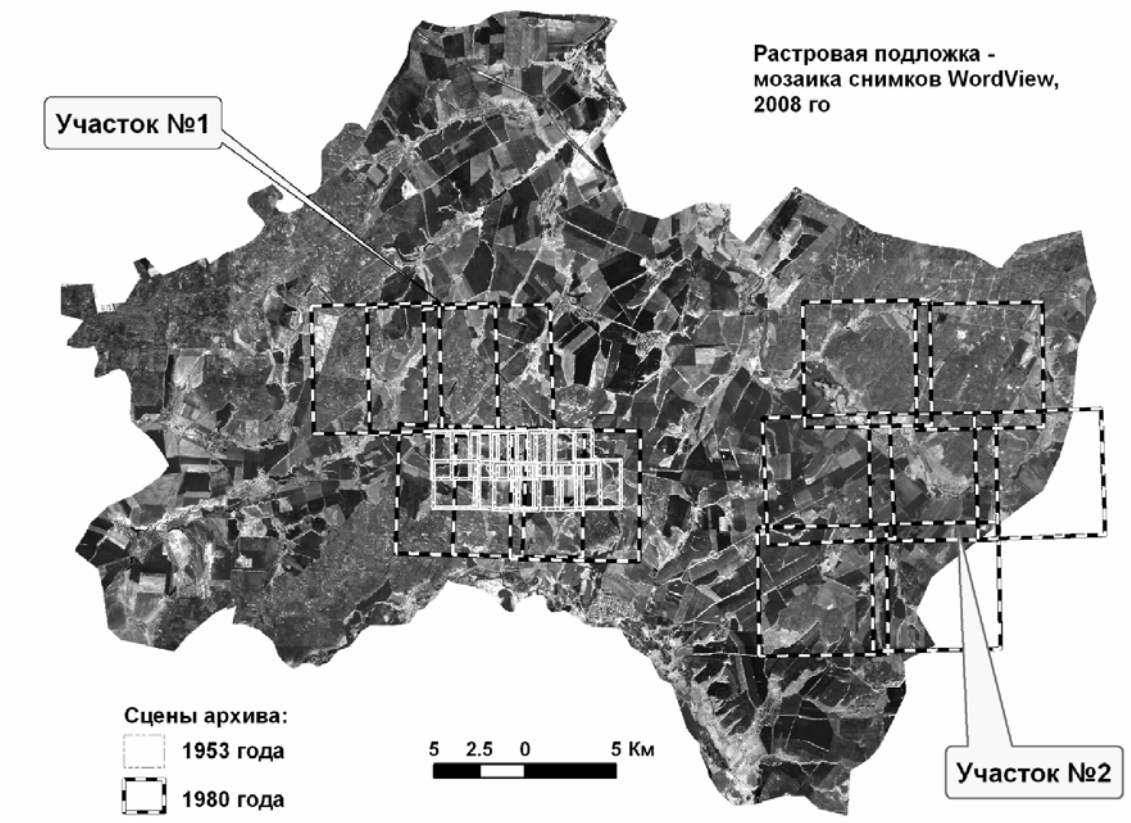

Рис. 1. Тестовые участки:
№1 расположен на водоразделах 3 крупных рек, район интенсивной добычи нефти, с развитой транспортной сетью. Долины р. Бол. Сульча и ее притоков заняты пашнями, водораздельные пространства покрыты лесами; №2 расположен в долине р. Шешма. Река пересекает участок с юго-востока на северо-запад. Большая часть участка южнее русла Шешмы занята сельхозугодиями. Территория, расположенная севернее русла Шешмы, покрыта лесами

Методика обработки данных. Обработка архивного материала проводилась в 2 основных направлениях:

1) ортотрансформирование аэрофотоснимков, создание и анализ стереопар, извлечение цифровых моделей местности (ЦММ) на основе фотограмметрической обработки стереопар;

2) геометрическая коррекция и взаимная увязка аэрофотоснимков и космоснимков в плане.

Поскольку аэрофотосъемка выполнялась с широкими перекрытиями изображений (практически 100%), потенциально возможно создание стереоизображений, а также блоков триангуляций для создания ортофото и ЦММ. Создание высокоточных ЦММ и ЦМР было бы весьма интересно для проекта, т.к. сравнение разновременных цифровых моделей рельефа могло бы дать количественную оценку интенсивности современных геодинамических движений. Однако мы столкнулись с рядом технических сложностей, некоторые из них оказались непреодолимые. Так, например, для создания качественного ортофото и качественной ЦМР необходимо совершенно точно знать параметры съемочной камеры. Но эти данные с архивными аэрофотоснимками не поставлялись. Поиски справочных данных также оказались безуспешными: информация о старой съемочной аппаратуре утеряна. Поэтому фокусное расстояние съемочной камеры было определено ручным способом по стандартной методике [2]. Кроме того, на многих аэрофотоснимках полностью или частично были срезаны координатные метки. Для таких снимков построение блочной триангуляции невозможно. В коллекции 1980 г. оказалось больше всего снимков с сохранившимися координатными метками. Для этой же коллекции удалось вычислить параметры съемочной камеры. Таким образом, у нас появилась возможность построить ЦММ и сравнить их с ЦМР, созданными в результате векторизации планшетов топокарт масштаба 1:25000. Для расчета блочной триангуляции, создания стереопар и ЦММ использовалась цифровая фотограмметрическая станция LPS [3]. Для определения положения опорных точек в плане использовалась мозаика снимков WordView. Высотное положение опорных точек было определено по топографическим картам.

Сравнение рассчитанной ЦММ и ЦМР, полученной в результате векторизации планшетов топокарт показало, что качество ЦММ не уступает качеству цифровой модели рельефа, масштаб которой в 2 раза крупнее. Более того, ЦММ имеет большую детальность. Лесные массивы, расположенные на склонах холмов, создают некоторую шероховатость ЦММ, которая, впрочем, может быть скорректирована в редакторе рельефа LPS. Таким образом, информативность и качество ЦММ масштаба 1:50000 более, чем удовлетворительны. Если у нас появиться возможность получить не менее детальную ЦМР на сегодняшний день, мы сможем получить количественные оценки современных рельефообразующих процессов (объем и скорость выносимого материала, скорости роста/сокращения овражной сети и др.).

Стереопары, полученные после операции ортотрансформирования, также были весьма полезны. Поскольку блочная триангуляция была выполнена с приемлемой точностью, имелась возможность проводить 3D измерения изучаемых объектов непосредственно на стереопарах. Визуальное дешифрирование проводилось в анаглифических очках в стерео режиме (использовался модуль Stereo LPS). Так, для линейных объектов таких, как тальвеги оврагов и балок, русла временных водотоков, определялась 3D-длина, 3-х мерная координата каждой узловой вершины, уклон, частное и среднее превышение, средняя высота, азимут простирания, геометрический угол между вершинами, ширина долин оврагов и балок. С помощью линейки инструментов 3D Measurements Tools была детально измерена геометрия овражной системы на участке №1 вблизи поселков Лашманка и Новое Ильмово.

Стереопары без геометрической коррекции также оказались весьма полезны. Известно, что разрешающая способность стереопары в $\sqrt{2}$ раз выше, чем разрешающая способность одиночных снимков [1]. Рельеф местности воспринимается в преувеличенном виде, что облегчает изучение различных микроформ. Следствием этого является то, что трудно дешифрируемые (или вовсе недешифрируемые) на плоских изображениях объекты, на стереопарах становиться легко распознаваемыми и интерпретируемыми. Например, на наших изображениях часто можно увидеть темные узкие протяженные полигоны. На одиночных плановых изображениях очень трудно идентифицировать, что это такое: заросшая влажная балка, узкая полоса свежевспаханного поля, часть дороги, строительная площадка или что-то другое? На стереоизображениях такие объекты дешифрировались однозначно.

К сожалению, для коллекции снимков 1953 г. не удалось создать ни одного стереоблока, т.к. почти все изображения лишены координатных меток. Данные архива 1953 г. использовались для анализа изменений элементов ландшафта и рельефа в плане, в период с 1953 по 2008 гг. Методы обработки снимков 1953 г. сводились к подгонке планового изображения снимков к изображению мозаики WordView, т.е. к их геометрической коррекции и определению системы координат. Геометрическая коррекция выполнялась в модуле IMAGINE AutoSync, средняя ошибка трансформации составила 0,5 м. Далее трансформированные изображения загружались в геоинформационный проект для визуального сравнения и анализа разновременных изображений.

Сравнительный анализ разновременных данных ДЗ. В итоге для сравнительного анализа была использована небольшая часть архивного материала: 14 снимков архива 1980 г. и 14 снимков архива 1953 г.. Но даже эта небольшая коллекция показала, что за 50 лет рельеф и ландшафт территории может претерпевать существенные изменения. Часть изменений имеет явно техногенное происхождение (строительство плотин и запруд, строительство каналов и перенос русла реки), что, вообще говоря, для нашего исследования интереса не представляет. Но такие изменения могут быть интересны с точки зрения экологии, сельского хозяйства или планирования развития территории. Другие изменения можно почти уверено отнести к проявлениям современной геодинамики. Известно, что если территория испытывает восходящие движения, ее ландшафт и формы рельефа приобретают специфические очертания [6]: возрастают абсолютные отметки высот, русла рек и других водотоков спрямляются или приобретают резкие повороты (вплоть до 90^0), объем выносимого материала увеличивается, стремительно развивается овражная сеть (увеличивается глубина и линейные размеры оврагов, промоины быстро превращаются в овраги). В случае тектонического опускания территории эрозионные процессы затухают, овраги зарастают, мелкие постоянные и временные водотоки исчезают, а крупные начинают меандрировать. На территории участков тестирования (№№ 1, 2, рис. 1.) общей площадью всего лишь 420 км^2 мы обнаружили почти все перечисленные признаки проявления современных геодинамических процессов. С этой точки зрения интересно рассмотреть историю развития овражных сетей вблизи поселков Лашманка и Новое Ильмово (рис. 2, 3).

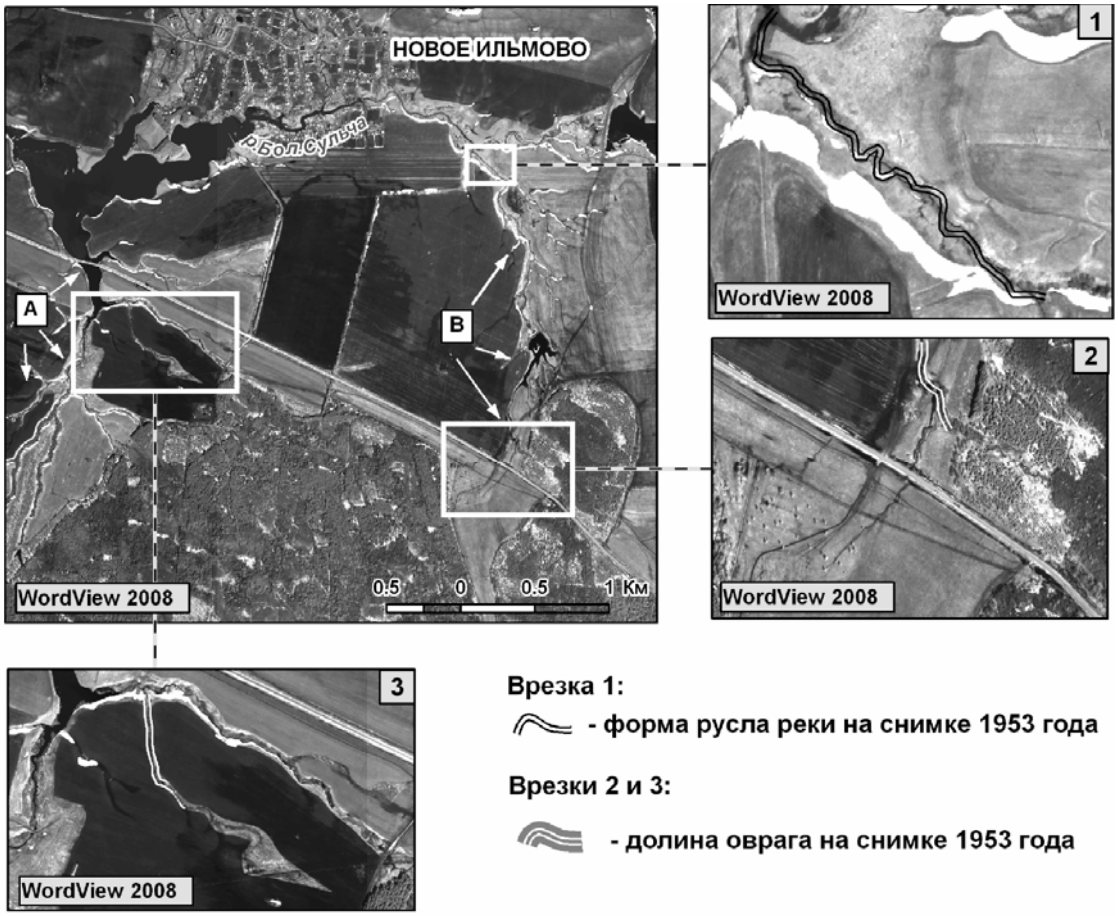

Рис. 2. Сравнение архивных и современных данных: выявление признаков развития эрозионных сетей А и В

В пределах участка №1 оказались 4 крупные овражно-балочные сети, которые мы условно назвали A, B, C, D (рис .2, 3). Сети A, B, C относятся к бассейну р. Большая Сульча, сеть D впадает в р. Большой Черемшан, русло которой находится за пределами изучаемой территории. Несмотря на то, что сети A, B, C относятся к бассейну одной реки и даже расположены на одном и том же склоне долины, развивались они по-разному. Сети A, B и C к 1953 г. уже достигли большой длины (2,5-3,5 км) и имели сложную сеть отвершков. По-видимому, сети находились в стадии активного роста и создавали большие проблемы для ведения сельского хозяйства. Поэтому в период между 1953 и 1980 гг. на р. Бол. Сульча были построены запруды вблизи поселков Лашманка и Новое Ильмово. Ожидалось, что развитие овражных сетей прекратиться, но реакция сетей оврагов оказалась различной. Несмотря на близость запруды, отвершки овражной

сети А продолжили свое развитие. На врезке 3 рисунка 2 показан рост оврага за период с 1953 по 2008 гг. (скорость роста не менее 9 м/год). К 2008 г. овраг пересек все пахотное поле, кроме того выше по склону образовался еще один овраг. Ответвления, расположенные в нижней части оврага В прекратили расти в длину, но в балки не превратились. Несмотря на то, что в верховье оврага была создана еще одна небольшая запруда, овраг продолжил свое развитие. Верховье овражной сети В раздвоилось: один отвершек обогнул лесной массив и продвинулся в верх по склону на 440 м (скорость роста не менее 8 м/год), второй продвинулся вдоль склона и пересек лесной массив шириной 220 м (рис. 2, врезка 2). В низовьях овражной сети В овраг превращается в речку, которая впадает в р. Бол. Сульча. За 55 лет форма русла речки существенно изменилась: наблюдается явное спрямление русла реки (рис. 2, врезка 1). После возведения плотины ответвление овражной сети С развивались по-разному (hbc/3). Большая часть ответвлений деградировали и превратились в балки. На врезке 2 рис. 3 мы наблюдаем, что овраг длиной более 1 км за период наблюдения полностью превратился в балку, причем ширина балки местами достигает 200 м. Исключение составляет одна ветвь оврага, которая от запруды распространяется вверх по склону строго на юг. Для этой ветки характерно не только существенно медленная деградация существующих отвершков (рис.3, врезка 1), но и образование новых отвершков (скорость роста не менее 2 м/год). Для овражной сети D сравнение данных показало, что эта сеть за наблюдаемый период времени существенных изменений не претерпевала. По-видимому, овражная сеть D сформировалась раньше сетей А, В и С и к настоящему времени находится в состоянии устойчивого равновесия.

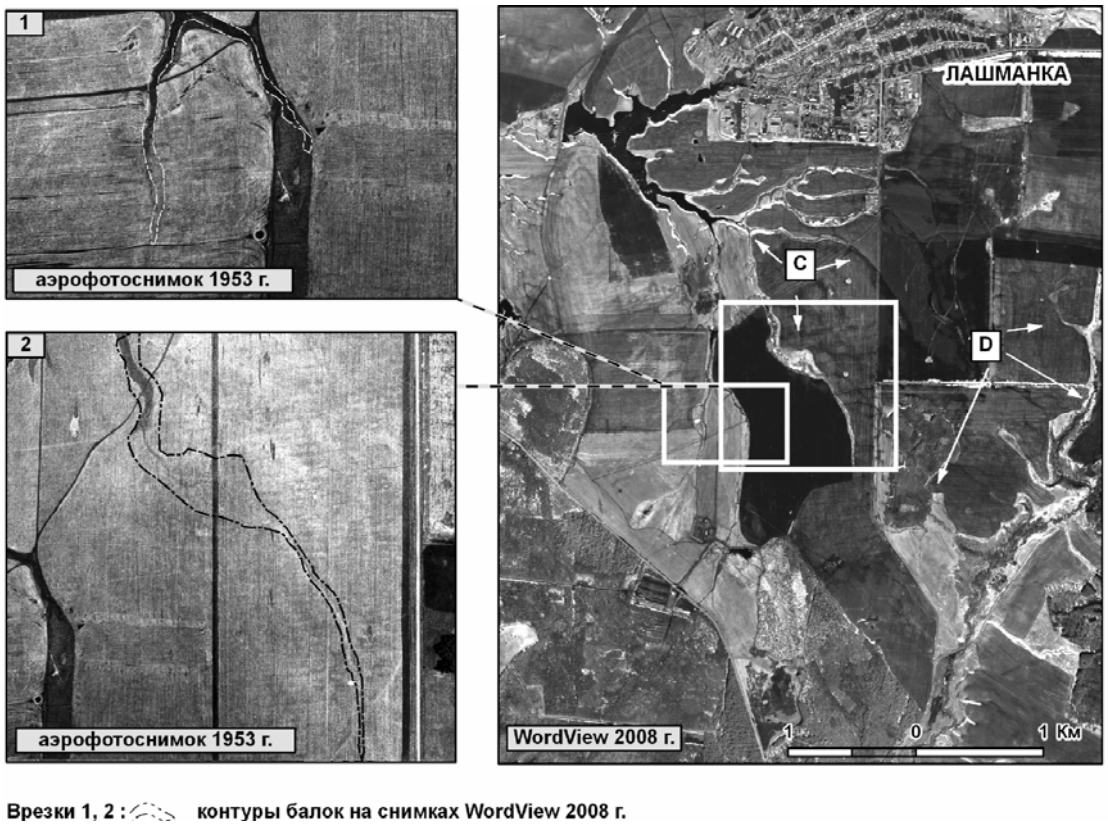

Рис. 3. Сравнение архивных и современных данных: выявление признаков деградации эрозионных сетей С и D

Для участка 2 также было проведено детальное сравнение овражных сетей и анализ их развития за период с 1980 по 2008 гг. Несмотря на то, что детальность и качество изображений съемки 1980 г. ниже, чем 1953 г., удалось сделать ряд интересных наблюдений. Было выявлено несколько областей с проявлениями современной геодинамики, как положительного, так и отрицательного знака (рис. 4). В пределах полигонов 1, 2, 3 наблюдается интенсивный размыв крутых склонов положительных форм рельефа. В пределах полигонов 6, 9, 10 наблюдается исчезновение оврагов и промоин, сокращение длины оврагов. Почти всю площадь полигонов 5, 7 и 8 занимают леса. На снимке 1980 г. видно, что во многих местах лесные массивы вырублены, и площади обрамляют довольно густые сети оврагов. Позже вырубки прекратились, овраги начали зарастать. На снимке 2008 г. видно, что все вырубки заросли молодым лесом, но овражная сеть в пределах полигонов 5 и 8 почти также хорошо заметна, как и на снимке 1980 г. А вот

овражная сеть в пределах полигона 7 практически исчезла.

Обобщение результатов сравнительного анализа разновременных данных представлено на рис. 4. Растровой подложкой рисунка является одна из разновидностей морфометрических поверхностей [6], рассчитанная по усовершенствованной методике [7]. Поверхность представляет собой разность базисных поверхностей 1-го и 2-го порядков [6, 7] и показывает направленность и интенсивность тектонических движений, произошедших в период времени между современным и самым поздним этапами истории развития рельефа (не ранее голоцена). Следовательно эта поверхность является отражением современного тектонодинамического состояния исследуемой территории. Т.к. поверхность была рассчитана по ЦМР масштаба 1:200000, представленные на ней неотектонические формы являются региональными для наших более детальных исследований. Очевидно, что существует прямая связь между проявлениями неотектонической активности и проявлениями современной геодинамики: области деградации эрозионной сети приурочены к областям неотектонического опускания, области с положительной динамикой расположены в непосредственной близости к средне и высокоамплитудным неотектоническим поднятиям. Этот факт, помимо того, что он еще раз подтверждает основные положения теории формирования современных форм рельефа, может быть использован и в чисто практических целях. Например, мы можем уверенно сказать, что при всех прочих равных условиях геологические предпосылки возобновления роста овражных сетей C и D отсутствуют, и ближайшем будущем здесь можно вести выращивание сельскохозяйственных культур без опаски серьезно разрушения почвенного покрова. Напротив, вырубка лесов южнее поселка Новое Ильмово может привести к быстрому росту сетей A и B (рис. 2).

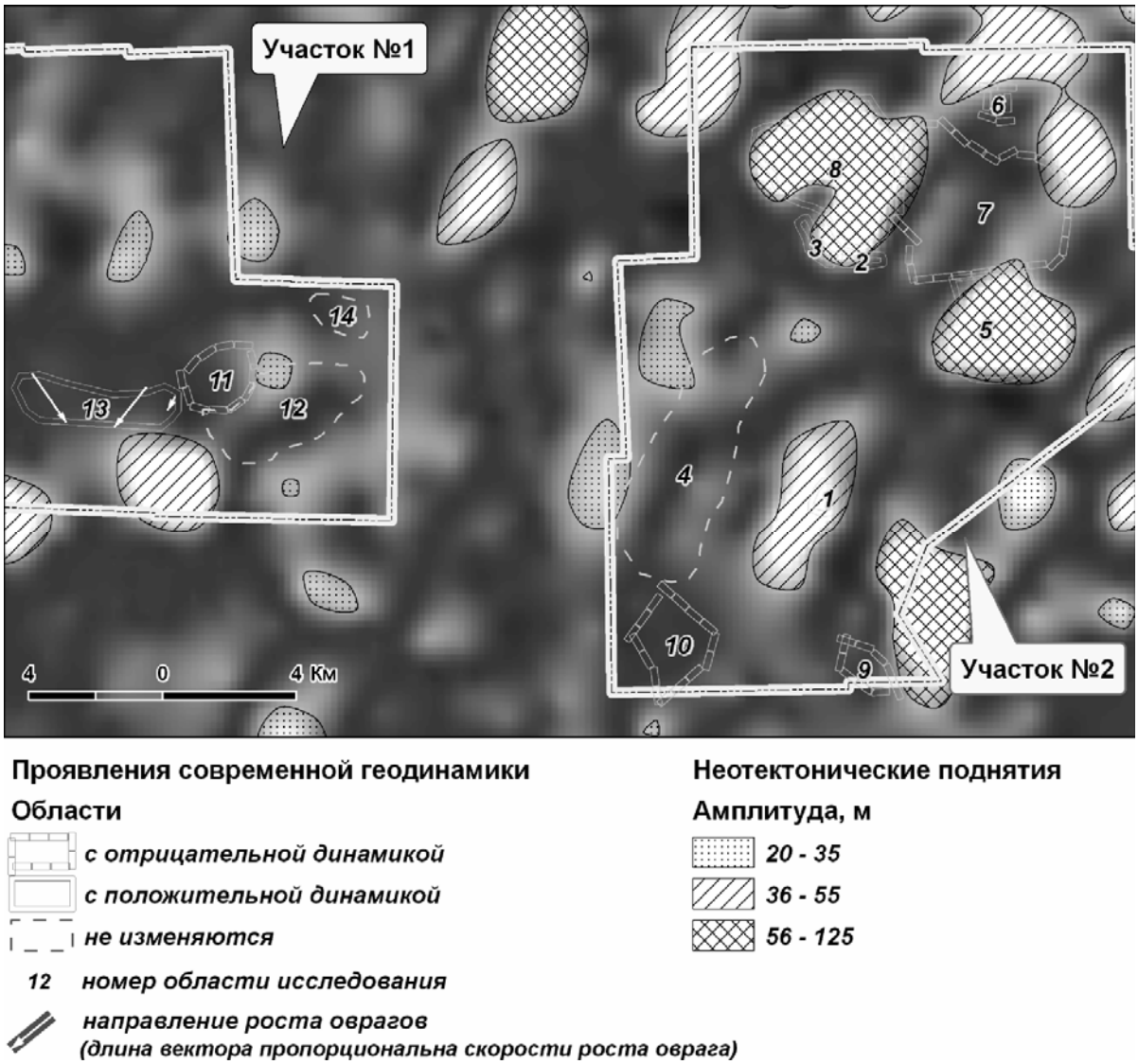

Рис. 4. Сопоставление проявлений современной геодинамики и признаков неотектонической активности в пределах территории исследования

Выводы: несмотря на то, что некоторые моменты интерпретации полученных результатов носят дискуссионный характер, основные цели данной работы постигнуты. Показана информативность подхода к изучению рельефообразующих процессов по архивным данным ДЗ. Применение фотограмметрии и ГИС дает нам новые возможности для исследований и новые сведения об изучаемых явлениях. Потенциально возможна обработка сотен и даже тысяч снимков, а статистически значимый объем информации даст, в свою очередь, более надежные результаты.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № П794).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Книжников, Ю.Ф.* Аэрокосмические методы географических исследований: Учеб. для студ. высш. учеб. заведений / *Ю.Ф. Книжников, В.И. Кравцова, О.В. Тутубалина*. – М., Издательский центр: «Академия», 2004. – 336 с.
2. *Лобанов, А.Н.* Аэрофототопография. – М.: Недра, 1978. –399 с.
3. Справочное руководство Field Guide. Copyright (C) 2005 ERDAS, Inc. All right reserved. Перевод на русский язык (C) 2009 ООО ДАТА+.– М.: Изд-во Дата+, 2009. – 707 с.
4. *Трацевская, Е.Ю.* Современное динамическое состояние геологической среды г. Гомеля и его влияние на инженерно-геологические условия / *Е.Ю. Трацевская, О.К. Абрамович* // ЛІТАСФЕРА. – 2008. - №3(29). – С.110-117.
5. *Филатов, А.В.* Обнаружение подвижек земной поверхности в зоне интенсивной нефтедобычи методами радарной интерферометрии // Вестник Югорского государственного университета. – 2006. - № 4. – С. 103-109.
6. *Философов, В.П.* Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. – Саратов, Изд-во Саратовского ун-та, 1975. –232 с.
7. Чернова, И.Ю. Обнаружение и исследование зон новейших движений земной коры инструментами / И.Ю. Чернова, Д.И. Хасанов, И.Я. Жарков и др. // ГИС ArcReview. Современные геоинформационные технологии. – М.:ООО ДАТА+, 2005. – № 1 (32). – С.6-7.
8. Электронный ресурс – http://www. geokosmos.ru/ solutions/monitoring/adversity.

MONITORING OF LANDFORMING PROCESSES WITH APPLICATION OF PHOTOGRAMMETRY AND GIS

© 2010 I.Yu. Chernova, I.I. Nugmanov, A.N. Dautov, P.S. Krylov

Kazan State Uiversity

The purpose of researches was development of elements of technique for information extraction about landforming processes of archival and modern data of remote sounding (RS) with use of the newest technologies of data processing of RS, including photogrammetry and GIS. It is shown high informativeness and economic gain of the offered elements of technique. It is shown, that results of executed monitoring researches can be used at the decision of the broad audience of applied problems.

Key words: *monitoring, erosion processes, geodynamics, photogrammetry, GIS*

Inna Chernova, Candidate of Geology-Mineralogy, Associate Professor at the Department of Geophysics. E-mail: inna.chernova@ksu.ru
Ilmir Nugmanov, Post-graduate Student. E-mail: nusmumrik@gmail.com
Iyrat Dautov, Post-graduate Student. E-mail: dizel07@yandex.ru
Pavel Krylov, Student. E-mail: strint@front.ru