

УДК 910.3

ЦИФРОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Мендыбаева Г.Е.¹, Орынгожин Е.С.¹, Асылбекова А.А.¹, Еремин Н.А.²

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан

²Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, г.Москва, Россия

Аннотация. Актуальность темы исследования определяется необходимостью проведения комплексного анализа большого количества пространственных данных для изучения пространственной дифференциации компонентов природной среды. В статье рассматриваются методические основы использования данных дистанционного зондирования, которые дают детальную оценку о пространственной структуре земной поверхности и позволяют проводить наблюдения за сезонными изменениями природной среды. Использование данных дистанционного зондирования важна при проведении автоматического распознавания растительности с использованием спектральных кривых в различных зонах спектра. В настоящее время существует много показателей, отличающихся отражательной способностью растений в различных зонах спектра, характеризующих состояние растительности, таких как LAI, NDVI, PVI и др.

Ключевые слова: цифровое картографирование, данные дистанционного зондирования, компоненты ландшафта, рельеф, дешифрирование снимков.

DIGITAL MAPPING BASED ON REMOTE SENSING OF THE EARTH DATA ANALYSIS

Abstract. The relevance of the research topic is determined by the need for a comprehensive analysis of a large amount of spatial data to study the spatial differentiation of components of the natural environment. The article discusses the methodological foundations of the use of remote sensing data, which provide a detailed assessment of the spatial structure of the Earth's surface and allow observations of seasonal changes in the natural environment. The use of remote sensing data is important when performing automatic vegetation recognition using spectral curves in different spectral zones. Currently, there are many indicators that differ in the reflectivity of plants in different spectral zones characterizing the state of vegetation, such as LAI, NDVI, PVI, etc.

Keywords: digital mapping, remote sensing data, landscape components, relief, image deciphering.

Введение. Дистанционное изучение факторов пространственной дифференциации компонентов природной среды по данным дистанционного зондирования Земли важна, прежде всего, для разработки принципов и методов цифрового картографирования. Развитие этого направления обосновано современными возможностями вычислительной техники и географических информационных систем (ГИС) к сопряжённому анализу большого количества пространственных данных. Ещё Докучаев В.В. (1899) развивая свои идеи, отмечал, что существенную роль в природе играют не отдельно взятые природные тела и явления, а их соотношение и закономерная связь [2]. В связи с этим возникла необходимость в комплексном подходе к выяснению пространственной взаимной связи между таксономическими единицами природной среды, параметрами растительности, почвы и рельефа для целей цифрового картографирования природных ресурсов.

Применение данных дистанционного зондирования земли (ДДЗ) при решении подобных задач позволяет привлечь к анализу большое количество параметров компонентов природной среды, которые должны учитываться при картографировании территорий.

Методы исследования. Методические основы и принципы использования данных дистанционного зондирования разрабатываются с середины XX века для целей геолого-геоморфологического, геоботанического, почвенного и ландшафтного картографирования [3, 4, 5, 6]. Аэрокосмические методы изучения природной среды дают наиболее детальную оценку о пространственной структуре земной поверхности и позволяют проводить наблюдения за сезонными и многолетними изменениями природной среды [7].

Согласно И.К. Лурье [8] данные дистанционного зондирования земли (ДДЗ) являются важнейшим источником оперативной и современной информации о природной среде для создания тематических слоев в географических информационных системах (ГИС), тематических карт, для поддержания данных в актуальном состоянии и других целей.

Сегодня в XXI веке информационные ресурсы являются одним из важнейших видов ресурсов любого государства, без использования которых в принципе невозможно эффективно осуществлять функции управления на любом уровне. Внедрение информационных технологий отражает усложняющуюся структуру экономики, расширяющиеся международные связи и кооперацию по решению целого ряда экономических, политических и социальных задач.

Анализ и обсуждение. Дистанционное зондирование представляет собой процесс, посредством которого собирается информация об объекте, территории или явлении без непосредственного контакта с ним. Благодаря своим свойствам космические снимки находят широкое применение как в практической, так и в научной сферах. Космическую съёмку применяют в исследованиях, направленных на всестороннее изучение природных ресурсов.

Данные дистанционного зондирования (ДДЗ) являются объективной, оперативной, и многоцелевой информацией о земной поверхности. ДДЗ содержат суммарную информацию обо всех компонентах ландшафта, определяющих его дистанционное изображение. Существует большое многообразие ДДЗ. В последнее время, в связи с совершенствованием сенсорной аппаратуры, наибольшее распространение получили дистанционные материалы, получаемые из космоса.

Дистанционные методы исследования природных объектов обеспечивают большую обзорность, возможность повторного получения данных через определённые промежутки времени, высокую скорость получения и передачи изображений, а также возможность применения комплексного анализа и оценки динамики развития явления на основе оперативного картографирования.

Использование результатов космической съёмки для целей картографирования обуславливается исключительно ценными свойствами космических снимков: большой территориальный охват и вытекающая из этого высокая генерализованность изображений; изучение по снимкам основных структурных, региональных и зональных особенностей планеты в целом; единовременность выполнения съёмки обширных территорий, что дает возможность изучать связь всех компонентов ландшафта; регулярная повторяемость съёмки, позволяющая изучать динамику природных явлений – периодических (суточных, сезонных) и эпизодических (лесные пожары, извержения вулканов и т. д.), а также хозяйственную деятельность (посевные площади, созревание, уборка урожая, загрязнение суши и моря). Составленные по космическим снимкам карты являются более современными и достоверными и отображают явления, которые в отсутствие таких снимков вообще не могли бы быть картографированы. Основные преимущества использования данных дистанционного зондирования для составления карт: актуальность данных на момент исследования, высокая точность определения границ объектов, более высокий коэффициент объективности выделения объектов и отнесения объекта к определённому классу. Кроме этого, использование данных дистанционного зондирования позволяет сократить объем наземных исследований и таким образом сократить сроки исследования [11, с.26].

ГИС-технологии способствовали развитию методов нового направления в картографии – геоинформационного картографирования (ГК) – автоматизированного создания и использования карт на основе баз географических данных и знаний.

Картографирование (процесс создания электронных карт) сложная и трудоёмкая процедура, она включает следующие основные этапы:

- 1) автоматизированное преобразование исходной картографической информации в цифровую форму;
- 2) символизация цифровой картографической информации и автоматизированное составление электронных карт;
- 3) разработка пользовательской системы управления базами данных для работы с электронными картами.

На первом этапе решается задача получения на основе имеющихся исходных картографических материалов (аэрокосмических снимков, расчлененных оригиналов и цветных тиражных оттисков карт) векторной цифровой модели карты — основы электронной карты. Эта задача решается следующими основными методами: 1) методом цифрования исходных картографических материалов на планшете путём отслеживания контуров объектов, подготовки и ввода семантики, структуризации цифровой информации; 2) методом сканирования исходных картографических материалов с последующей автоматической или интерактивной векторизацией и распознаванием растрового изображения на экране дисплея, ввода требуемой семантики и структуризации цифровой информации.

На втором этапе решаются задачи: – символизации векторной модели; – составления электронной карты по уровням нагрузки; – контроля и редактирования символизированных электронных карт; – получения архивной графической символизированной копии электронной карты. Сущность процесса символизации состоит в присвоении каждому объекту кода соответствующего условного знака из библиотеки условных знаков по классификационному коду, характеристикам объектов и их значений. В процессе составления электронных карт по уровням нагрузки осуществляется программный и визуальный контроль и редактирование информации, которое, в основном, сводится к размещению подписей объектов. Процесс создания электронных карт завершается получением символизированной графической копии последовательно для каждого уровня нагрузки, начиная с первого. Формирование электронных карт осуществляется в универсальной структуре данных, обеспечивающей возможность записи векторной информации, как в последовательном, так и в цепочно-узловом представлении, в растровом виде, справочной информации, а также формирование сегментов данных пользователей. Технология реализуется на комплексе автоматизированных рабочих мест, объединённых в локальную вычислительную сеть. Все самые основные качества и преимущества электронных карт проявляются при их использовании.

Результаты. Как известно одним из ведущих компонентов природной среды является рельеф. Рельеф – фактор формирования почвенного и растительного покрова территории, фактор перераспределения тепла и влаги, а также фактор, определяющий напряжённость современных геологических процессов [25]. Надо заметить, что рельеф имеет отражение, как на многозональных, так и на радиолокационных снимках.

Исходными данными при создании карты рельефа, являются данные SRTM, которые распространяются квадратами размером 1 x 1 градус (рисунок 1). При максимальном доступном разрешении 3 угловых секунды такой квадрат является матрицей размером 1201x1201 элементов (пикселей). Один дополнительный ряд (нижний) и одна колонка (правая) являются дублирующим и повторяется на соседней матрице. Данные являются простым 16 битным растром (без заголовка), значение пикселя является высотой над уровнем моря в данной точке. Пиксели могут принимать значение –32768, что соответствует значению no data (нет данных).

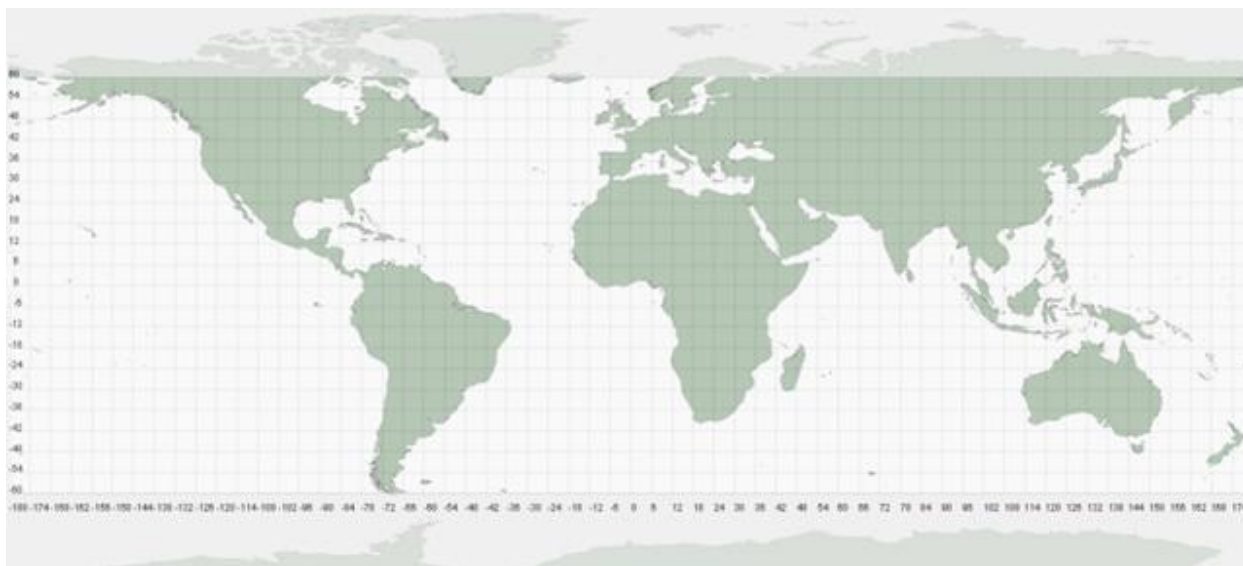


Рисунок 1. Схема покрытия поверхности Земли съемкой SRTM. Каждая ячейка сетки имеет размер 6 градусов и покрывает 36 квадратов данных SRTM

Определить нужный квадрат можно, используя сетку-разграфку или электронную карту мира, с помощью которой находят координаты интересующего района.

Расчёт основных морфометрических параметров рельефа по радиолокационным снимкам позволяет разделить земную поверхность на площадные элементы или контуры, в пределах которых проводится анализ пространственных взаимосвязей с характеристиками почвенно-растительного покрова. Далее используется отмывка рельефа вырезанной области (в программе ArcGIS).

Для выполнения задачи по созданию выразительной тематической поверхности рельефа логично воспользоваться набором инструментов Surface (Поверхность) из модуля Spatial Analyst. Далее используем утилиту Topo to Raster из набора Interpolation (Интерполяция). На вход утилиты подаём растр, и получаем вектор изолиний. На карте высот могут быть представлены перепады высот местности, хорошо передаются отдельные мезоформы рельефа, характер водоразделов, особенности склонов.

Прогресс в дешифрировании рельефа наступил с появлением радиолокационных снимков и цифровых моделей рельефа, структура данных которых позволяет проводить их автоматизированную обработку. В работах последних лет [28, 29, 30, 31] появились модели, предсказывающие детальное распределение характеристик растительности и почв с использованием морфометрических параметров рельефа, полученных путём анализа цифровых моделей рельефа.

При дешифрировании рельефа местности особое значение приобретает пространственная, объёмная форма объектов. Один из способов ее определения – стереоскопическое наблюдение пары перекрывающихся снимков [27, с. 52]. Последние достижения в интерферометрии позволяют создавать цифровые модели рельефа на основе радиолокационных снимков, которые в последствии могут быть представлены в объёмном трёхмерном виде [32].

При дешифрировании в геологических целях наибольшей геоинформативностью отличается видимый и ближний инфракрасный (ИК) диапазон. По мнению космонавта, профессора В. П. Савиных около 80 % информации, поступающей в настоящее время из космоса, приходится на этот диапазон.

Геологические объекты (горные породы, структурные элементы, формы рельефа земной поверхности) испускают электромагнитные волны, которые содержат как собственное излучение, так и отражённое излучение энергии Солнца. Экспериментальными исследованиями установлено, что величина и характер электромагнитных колебаний во многом зависит от структурных и литологических особенностей поверхности литосферы.

Существующие различия в электромагнитном излучении разнородных геологических образований позволяет применять для их изучения методы дистанционного зондирования.

В геологическом дешифрировании в основном используют многозональные снимки, которые позволяют получить дифференцированные изображения в узких диапазонах спектра и интегральные изображения в видимой и ближней ИК-областях. По сравнению с традиционной съёмкой в видимом диапазоне расширяется объем извлекаемой информации как за счёт большого (4–6 и более без учёта синтезирования) числа снимков на одну и ту же территорию, их более высокого разрешения на местности, так и за счёт увеличения от дешифрированных объектов в результате детальной проработки их индикационных признаков в узких зонах спектра.

Проведение многозональной съёмки эффективно для изучения территорий со следующими геолого-ландшафтными условиями:

1) складчатые области с разнородным литологическим составом горных пород наряду с их сильной тектонической дислоцированностью, в особенности, когда размеры отдельных картографируемых тел существенно меньше плотности маршрутной сети (например, участки развития интрузивных даек и жил);

2) районы со сложным характером распределения геологических тел, когда границы между ними имеют извилистую конфигурацию или выражены постепенными переходами;

3) платформенные области в случае отражения в осадочном чехле погребённых структурных форм (например, при поисках нефтегазоносных структур);

4) в гумидной лесной зоне при ландшафтной индикации четвертичных отложений.

Использование аэрокосмических методов при почвенных исследованиях основано на том, что поглощение, излучение, рассеивание и отражение электромагнитной энергии различными почвами селективно и специфично для каждой почвы. Методики дешифрирования почв, не покрытых растительностью, и полностью покрытых растительностью, принципиально различаются тем, что осуществляются они соответственно по прямым и косвенным признакам, которые в свою очередь подразделяются на оптические, геометрические, структурные и текстурные.

Одним из важных, дешифровочных признаков почв и растительности является цвет и их различие в видимой и ИК-зонах спектра. Эти особенности в наибольшей степени учитываются при съёмках на спектральнозональную плёнку.

Согласно В.В. Докучаеву [34] почвы различаются по условиям их образования, происхождению, внешнему виду. При диагностике почв в полевых условиях используют множество признаков, но одним из главных остаётся цвет. При диагностике почв по данным дистанционного зондирования, при условии, что почва не покрыта растительностью - цвет является также главным признаком, от которого зависят спектральные отражательные свойства почв.

Использование аэрокосмических методов при почвенных исследованиях основано на том, что поглощение, излучение, рассеивание и отражение электромагнитной энергии различными почвами селективно и специфично для каждой почвы [35].

В зависимости от способа съёмки данные дистанционного зондирования Земли, наиболее часто применяемые для дешифрирования почв можно разделить на фотографические и сканерные снимки.

В связи со сложностью почвенного дешифрирования существенное значение имеет разработка и систематизация дешифровочных признаков почв разных природных зон и составление образцов (эталонов) дешифрирования почв. В процессе визуально-инструментального дешифрирования необходимо учитывать весь комплекс прямых и косвенных дешифровочных признаков: тон, рисунок, включающий текстуру и структуру изображения, размер и форму почвенных контуров, а также рельеф, растительность, гидрографию и другие признаки. При этом необходимо иметь в виду, что, например, одна и та же (по геометрической форме и размерам) текстура аэро- и космического снимка может иметь разное содержание и генезис.

Исследованиями Сорокиной Н.П. [46] была показана перспективность составления рабочей картосхемы типов фотоизображения с легендой, в которой описывается каждый тип фотоизображения с характеристикой микрорельефа и предварительной диагностикой элементарных почвенных структур (участие оглеенных, эродированных, засоленных, перерытых и др. компонентов). Согласно исследованиям Сорокиной Н.П. типизация рисунков фотоизображения основывается на их геометрии и сопровождается расшифровкой микрорельефа, который во многом определяет генезис элементарных почвенных структур, их компонентный состав и контрастность. В связи с этим важно систематизировать генетические типы микрорельефа, характерные для изучаемой территории.

В заключении следует подчеркнуть, что тон изображения одного и того же объекта на снимках разных залетов может быть более или менее различным, так как на тон изображения влияет очень много факторов. Тон зависит от освещенности поверхности, от структуры поверхности, влажности, от способности поверхности рассеивать свет, от цвета поверхности, цветочувствительности негативного материала и других его свойств, от свойств позитивного материала (фотобумаги) и условий обработки их [25, с. 125].

Спектральная отражательная способность зеленой растительности является характерным признаком и очень изменяется с длиной волны. Спектральные отражательные характеристики природных образований несут в себе специфическую информацию о поверхности земли и являются основой дистанционных методов ее исследования [53, с.37].

Считается, что растительность, естественная или культурная, является индикатором дешифрирования почвенного покрова, форм рельефа, грунтовых вод, подстилающих пород и отложений [45, с.75].

Методы дешифрирования растительности по данным дистанционной информации при всём их разнообразии сводятся к двум основным: визуальному и автоматизированному [27, с 145], в последнее время большей популярностью стали пользоваться автоматизированные методы, в связи с переходом на цифровое представление данных, которое позволяет хранить информацию о спектральной отражательной способности объектов в различных каналах, соответствующих определённым длинам волн электромагнитного спектра. Такая структура данных, позволяет автоматизировано рассчитывать, как спектральные характеристики растительности, так и различные коэффициенты, характеризующие как тип растительности, так и её параметры.

Наиболее существенное влияние на спектральный отклик растительности оказывают следующие доминирующие факторы: пигменты листа, структура клетки, содержание воды [53, с. 61]. Спектральная зависимость отражательной способности растительности определяется сильным поглощением хлорофиллом и каротиноидами в интервале 0,40 - 0,47 мкм и хлорофиллом в интервале 0,64 - 0,68 мкм, что приводит к наличию характерных минимумов в коэффициенте спектральной яркости растительности. Антоцианы оказывают существенное влияние в зеленой области спектра. В спектральном интервале 0,7 - 1,1 мкм, где пигментное поглощение мало, сильно возрастает коэффициент спектральной яркости листьев. На более длинных волнах доминирующую роль играет поглощение излучения водой, содержащейся в листьях. В диапазоне более 3 мкм лист поглощает практически не селективно 96 - 98% падающего излучения, что дает возможность определять дефицит влаги в почве по увлажненности листьев. К увеличению спектральной яркости в полосах поглощения хлорофилла, приводит недостаточная влажность и удобренность почв, недостаток света, заболевание растений, аномально высокая концентрация металлов в почве. В период цветения спектральная яркость, например, на длине волны 0,66 мкм может увеличиться в 2 раза. Все эти факторы позволяют эффективно использовать ДДЗ в оптическом диапазоне [35, с.19].

Исследованиями [53, с.75] показано, что между отражательной способностью листьев в среднем инфракрасном диапазоне и поглощаемостью слоя воды толщиной примерно 1 мм существует почти обратная зависимость. Степень поглощения растительностью падающей солнечной энергии в среднем инфракрасном диапазоне является функцией общего количества воды, имеющейся в листе, которое, в свою очередь, является функцией содержания влаги в

листе и толщины листа. При уменьшении содержания влаги в листьях их отражательная способность в среднем инфракрасном диапазоне длин волн заметно увеличивается.

Оптические свойства растительности тесно коррелируют с сезонным ритмом развития растений и увлажнённой почв. Наибольшей изменчивостью сезонного хода спектральной яркости обладает летне-зелёная группа растений, наименьшей - вечнозелёная [37, с.49].

Перспективность применения данных дистанционного зондирования особенно важна при проведении автоматического распознавания растительности с использованием спектральных кривых в различных зонах спектра.

Для определения физических параметров растительности пользуются коэффициентом яркости, определяемым в одном диапазоне или отношением яркостей в двух диапазонах. Так исследованиями подтверждается возможность использования косвенных методов оценки развития ассимиляционного аппарата по данным многозональной съёмки, таких как расчёт NDVI, для характеристики общей продуктивности наземной фитомассы древесных растений [57].

Помимо методов по дистанционному определению биофизических параметров используются так же различные преобразования данных дистанционного зондирования для подчёркивания некоторых закономерностей. При этом переходят от спектральных параметров, основанных на комбинациях отражения в различных зонах спектра к n -мерному спектральному пространству, где данные представлены в виде вектора. Было показано, что применение разновидности такого метода, известного как Tasseled Cap, позволяет определить тип вырубки по данным Landsat TM [58].

По разности между отражательной способностью растений в различных зонах спектра в настоящее время рассчитывается очень много показателей, характеризующих состояние растительности, например, таких как LAI (Leaf Area Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), PVI (Perpendicular Adjusted Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) и др.

Результаты классификации снимка обязательно необходимо согласовывать с результатами визуально-инструментального дешифрирования, а также с фоновыми и литературными данными, так как имеются определённые сложности при разделении комплексных классов, например: осоково-разнотравно-злаковые, разнотравно-овсецево-краснопыльчатые, разнотравно-осоково-красноковыльчатые и др. степные сообщества, где наблюдается перемешивание классов, приводящее к неоднозначной интерпретации результатов классификации.

Заключение. Информация, полученная ДДЗ широко распространена и используется для решения задач в самых различных областях науки и практики. Дешифрирование снимков прибора TM/ETM+ позволяет очерчивать границы районов разной степени опустынивания, изучать структуру землепользования, создавать карты ландшафтной структуры, выполнять их количественный анализ с определением степени разнообразия, преобладания характерных размеров и форм, степени раздробленности, фрактальных размеров, описывать выявленные особенности структуры ландшафтов, изучать процессы (включая построение моделей с высоким прогностическим потенциалом) урбанизированно-промышленного использования земель населённых пунктов.

Признаки, по которым распознаются объекты на снимках называют дешифровочными. Их принято делить на прямые и косвенные. Если свойства объекта находят непосредственное выражение в его изображении на снимке, то их называют прямыми дешифровочными признаками. К ним относят геометрические (форма, тень, размер), яркостные (цвет, спектральный образ и т.д.) и структурные (текстура, структура, рисунок) признаки. Косвенные признаки позволяют определить свойства объектов и картографировать объекты, не нашедшие прямого выражения на снимке. В их качестве обычно выступают прямые дешифровочные признаки других объектов, которые называют индикаторами.

Список использованной литературы

1. Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
2. Андроников В.А. Аэрокосмические методы изучения почв. М.: Колос, 1979. 280 с.
3. Афанасьева Т.В., Петрусевич Ю.М., Трифонова Т.А. Практикум по дешифрированию аэрофотоснимков при почвенных исследованиях. М.: Изд-во Московского ун-та, 1977. 157 с.
4. Видина А.А. Методические вопросы полевого крупномасштабного ландшафтного картографирования // В сб. «Ландшафтоведение». М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 102-127.
5. Виноградов Б.В. Космические методы изучения природной среды. М.: Мысль, 1996. 285 с.
6. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. М.: Изд-во «КДУ», 2008. 424 с.
7. Лурье И.К., Косиков А.Т. Теория и практика цифровой обработки изображений // Дистанционное зондирование и географические информационные системы. Под ред. Берлянта А.М. М.: Научный мир, 2003. 168 с.
8. Кравцова В.И. Космические методы картографирования. М.: Изд-во МГУ, 1995. 280 с.
9. Интернет-семинары Межуниверситетского аэрокосмического центра. Режим доступа. URL: <http://www.geogr.msu.mscience.aero/center/cont.htm>. (дата обращения: 18.10.2024)
10. Картоведение: учебник для вузов / А.М. Берлянт [и др.]; под ред. А. М. Берлянта. М.: Аспект Пресс, 2003. 477 с.
11. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие / О.С. Токарева. Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2010. 148 с.
12. Савиных В.П. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования / В.П. Савиных, В.Я. Цветков. М.: Картгеоцентр – Гео-дезиздат, 2001. 228 с.
13. Ласточкин А.Н. Рельеф земной поверхности. Д.: Недра, Ленингр. отд-ние, 1991. 340 с.
14. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды: учеб. пособие / В.И. Козинцев [и др.]; под ред. В. Н. Рождествина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 528 с.
15. Лаборатория дистанционных методов и геоинформационных систем (ЛДМ ГИС) ГГИ. Режим доступа. URL: <http://www.hydrology.ru/depart/dep/lgis/>. (дата обращения: 18.10.2024)
16. Кашкин В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учеб. пособие / В.Б. Кашкин, А.И. Сухонин. М.: Логос, 2001. 264 с.
17. Салищев К.А. Картография на службе регионального природопользования: состояние и задачи // Итоги науки и техники. Картография. М.: ВИНТИ, 2008. Т. 9. С. 9-21.
18. Космический аппарат. Режим доступа. URL: <http://mapgroup.com.ua/kosmicheskie-apparaty/58-kazakhstan>. (дата обращения: 18.10.2024)
19. Космический аппарат. Режим доступа. URL: <http://mapgroup.com.ua/kosmicheskie-apparaty/58-kazakhstan/1688-al-farabi>. (дата обращения: 18.10.2024)
20. Книжников Ю.Ф. Аэрокосмические методы географических исследований: учеб. для студентов вузов / Ю.Ф. Книжников, В.И. Кравцова, О.В. Тутубалина. М.: Академия, 2004. 336 с.
21. Лабутина И.А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ: метод. пособие / И.А. Лабутина, Е.А. Балдина. М., 2011. 88 с.
22. SRTM Documentation. NASA/JPL SRTM. Режим доступа. URL: <http://www.jpl.nasa.gov/srtm/> (дата обращения: 18.10.2024)
23. Чертов О.Г. Экология лесных земель. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1981. 192 с.
24. Лахин А.Я., Вызов Б.Е., Прищепа И.М. Военная топография. М.: Воениздат, 2003. 224 с.

25. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. М.: Аспект Пресс, 2004. 184 с.
26. Guisan A., Zimmermann N. Predictive habitat distribution models in ecology // *Ecological Modelling*. 2000. № 135 (2-3). P. 147-186.
27. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. // *Geoderma*. 2002. 107 (1-2). P. 1-32.
28. Moore I.D., Gessler P. E., Nielsen G. A., Peterson G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis // *Journal of Soil Science Society of America*. 1993. Vol. 57 (2). P. 443-452.