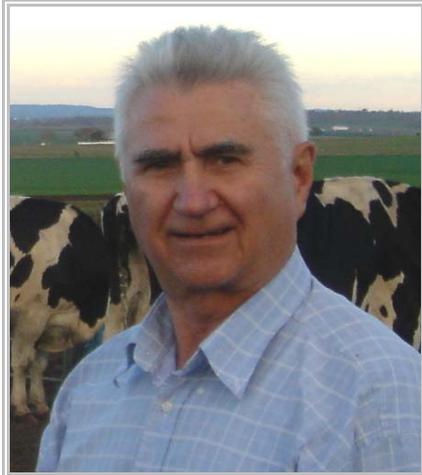


ОПРЕДЕЛЕНИЕ И МОНИТОРИНГ ПРОДУКТИВНОГО ПОТЕНЦИАЛА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

ASSESSMENT AND MONITORING OF THE AGRICULTURAL LAND PRODUCTIVITY



Нагорный В.Д. / Nagorny V.D.

Доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры земледелия Аграрного факультета Российского университета дружбы народов / Doctor of Agricultural Sciences, professor of chair "Agriculture" Agricultural Faculty of the Russian University of Peoples' Friendship.

e-mail: nagvic@yandex.ru

Аннотация. Определение естественной продуктивности земель и постоянный мониторинг их использования требуют качественно нового технического обеспечения и использования более совершенных методов оперативной оценки состояния земель, определения качества растительного покрова и урожайности выращиваемых культур. В статье рассмотрены различные подходы к решению данной проблемы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), топографическое, почвенное и агрохимическое картирование, региональные

центры дистанционного мониторинга (РЦДМ), земельные и водные ресурсы, окружающая среда.

Abstract. Determination of the soil productivity and regular monitoring of the Land require modern equipment, software and use of new sophisticated methods of effective evaluation of land, plant cover and assessment of crop yields. Different approaches in solving these problems have been considered.

Keywords: remote land evaluation, topography, soil fertility mapping, regional center of land monitoring, water and land resources, environment.

Сельскохозяйственное производство в большинстве регионов является основной отраслью местной экономики, предопределяющей экономический потенциал региона, занятость большей части населения и уровень его жизни. Эта сфера производства оказывает большое влияние не только на экономику, но и на всю окружающую природу. По всем этим показателям с этой отраслью может соперничать только горнодобывающая и нефтяная отрасли.

Забота о природных ресурсах и рациональном их использовании требует постоянного мониторинга всех территорий, где осу-

ществляется тот или иной вид хозяйственной деятельности человека. Комплексная оценка земельных и водных ресурсов может распространяться не только на используемые и потенциально пригодные для сельскохозяйственного производства территории, но и на вновь осваиваемые районы, и места, где осуществлялась добыча и переработка природных ископаемых и возникает необходимость в реабилитации нарушенных земель.

Экстенсивный характер использования сельскохозяйственных земель, получивший распространение во многих регионах России в последние двадцать лет, часто приводит к де-

градации почв, развитию эрозионных процессов, а в некоторых местах и к наступлению пустыни. Ярким примером такого явления является развитие опустынивания в некоторых районах Астраханской и Волгоградской области, в республиках Калмыкия, Дагестан и Хакассия, где на месте ранее продуктивных естественных пастбищ возникли полупустыни, подверженные ветровой и водной эрозии.

Другим примером иррационального использования земель и водных ресурсов являются опустыненные засоленные земли в районах орошаемого земледелия в Казахстане, Узбекистане, в странах Ближнего и Среднего Востока, в Северной Африке и других местах. В результате длительного и бесконтрольного орошения высоко минерализованными водами и при отсутствии надлежащего дренажа миллионы некогда плодородных земель превращены в бесплодные засоленные земли.

Полная инвентаризация земель, находящихся в пользовании, и выявление земель, пригодных для сельскохозяйственного производства, комплексная оценка почвенного и растительного покрова, оценка гидрологических условий и постоянный мониторинг природопользования на больших территориях в настоящее время невозможны без применения новых технических средств. К таковым в настоящее время относят специальные космические спутники и воздушные летательные аппараты, позволяющие дистанционно зондировать (обследовать) в периодическом режиме с разной частотой огромные территории и небольшие участки Земли [2, 3].

Методы дистанционного зондирования (ДЗЗ) в настоящее время широко используются в агропромышленном комплексе многих стран мира (США, Канада, страны Евросоюза, Индия, Япония и др.). Наиболее известным примером действующих систем сельскохозяйственного мониторинга можно отнести проекты MODIS и MARS (The Monitoring of Agriculture with Remote Sensing), реализуемые Объединенным исследовательским центром Еврокомиссии по мониторингу сельскохозяйственных земель. Используемые этим центром технические средства (космические спутники) и соответствующее программное обеспечение позволяют определять площади

земель и посевов, состояние растений и урожайность сельскохозяйственных культур [5, 9]. Причем это может быть сделано как на уровне отдельных стран или даже группы стран, так и на уровне отдельного района или даже отдельной фермы. Результаты ДЗЗ используются для прогноза урожаев различных культур и потенциальной степени наполнения рынка. Все это позволяет вырабатывать меры по стабилизации уровня доходности сельскохозяйственных производителей через применения гибкой системы цен, квот и экспортно-импортных отношений, корректировать налоговую политику.

В России пока еще только разрабатывается подобная Национальная Космическая система ДЗЗ для мониторинга земель сельскохозяйственного назначения. Эта работа ведется в рамках Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия (2008-2012 гг.) [1, 2].

Первый опыт применения ДДЗ показал, что для успешного мониторинга охраны природных ресурсов и надлежащего их использования в масштабе крупных административных и географических регионов необходимо иметь региональные сети станций приема космической информации. Должен быть обеспечен доступ к оперативной и архивной аэрокосмической информации, к существующей картографической и статистической информации по окружающей среде, физическим и химическим свойствам почв. Кроме того, необходимо владеть специфическими методами дешифрирования получаемой спутниковой информации и иметь соответствующие знания для обобщения накопленной информации и выработки рекомендаций для пользователей. Ясно, что удовлетворять таким требованиям могут только специализированные технически оснащенные предприятия, каких в Российской Федерации пока единицы. Именно технически оснащенные центры, имеющие соответствующий интеллектуальный потенциал способны организовать и осуществлять систематическое дистанционное зондирование Земли для решения таких масштабных задач, как:

- спутниковая радиолокация Земли для целей геологоразведки на суше и морском шельфе,
- мониторинг Земли в целях предотвращения чрезвычайных ситуаций и устранения их последствий,
- топографическое картирование для прокладки различных коммуникационных сетей,
- картографирование (в т.ч. в формате 3D) по заказу административных управлений,
- картографирование земной поверхности.

В интересах сельскохозяйственного производства дистанционным зондированием могут решаться следующие задачи:

- обеспечение текущего контроля состояния посевов сельскохозяйственных культур;
- раннее прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур;
- мониторинг темпов уборки урожая одновременно по территориям крупных регионов;
- определения емкости пастбищ различных типов и продуктивности сенокосов; и др.

Использование спутниковой информации по ДДЗ позволяет получать актуальную, полную и достоверную информацию о состоянии природной среды, о хозяйственной деятельности человека одновременно на обширных территориях. Однако пока еще не все предлагаемые методы ДДЗ получили признание. Но некоторые методы ДДЗ, используемые для оценки уровня минерального питания выращиваемых культур и их продуктивности, такие как: APOND (Air-born Plant Nutrition Differentiation – дифференциация питания растений по воздушным снимкам), и NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный индекс вегетации растений) находят все большее применение [4, 5].

APOND – это метод оценки уровня минерального питания растений и обеспеченности их водой на основе визуального или фотографического выявления разницы в цветовых оттенках растений [5]. Внешний вид растений и их масса хорошо отражают уровень обеспеченности их элементами минерального питания и водой и зависят от физи-

ческих и химических свойств почв. Все признаки хорошего и плохого состояния растений хорошо известны агрономам. Непосредственная визуальная оценка состояния растений в поле не всегда позволяет объективно оценить выравненность условий роста растений на большой площади. Напротив, аэрофотографическая съемка помогает точно определить состояние растений на большом пространстве поля, и четко определить границы участков, на которых растения имеют другую окраску и плохо развиваются. Такие снимки позволяют сосредоточить внимание на оценке условий роста растений на отдельных участках и соответствующим образом скорректировать программу работы по технологии так называемого «точного земледелия».

Но при этом надо учитывать, что ДДЗ – это высокоспециализированная услуга, доступная далеко не каждому разработчику недр и землепользователю, так как осуществляется с использованием сложного дорогостоящего оборудования и большей частью с привлечением услуг иностранных владельцев спутниковых аппаратов. Кроме того пока еще не накоплено достаточной информации для разработки методов дешифрования получаемых снимков земной поверхности, позволяющих с большой достоверностью определять качество почв и границы почвенных разностей, проводить диагностику состояния растений, выявлять причины снижения их продуктивности.

NDVI – это метод ДДЗ, позволяющий более достоверно и быстро определять уровень минерального питания, обеспеченности водой и темп формирования биомассы растений. В этом методе используются оптические генераторы, облучающие растения видимым светом и ближним ИК-спектром, и детекторы, регистрирующие отражение зеленого и ближнего инфракрасного спектров. Голубой и красный спектры дневного света поглощаются хлорофиллом, а зеленый и ближний инфракрасный спектры отражаются зеленой массой растений. Разница между поглощенным и отраженным спектрами, зарегистрированная детекторами позволяет оценить количество и качество зеленой массы. Хлоротичные, подверженные водному стрессу листья поглощают меньше фотосинтетически активной радиации (ФАР), чем здоровые и интенсивно

развивающиеся растения. Различная степень поглощения и отражения световой энергии и ИК-спектра позволяет одновременно определить несколько важных показателей, определяющих реальное состояние растений. В зависимости от технической (оптической) оснащенности спутников можно определить до 160 различных вегетационных индексов [5, 8]. Однако практическое применение нашли 27 вегетационных индексов, основными из которых являются индексы первой группы, определяемые по степени поглощения и отражения широких полос света в ближней инфракрасной области спектра:

- NDVI - Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный индекс вегетации растений $[NDVI=(K_{nir}-K_{red})/(K_{nir}+K_{red})]$, где K – коэффициенты отражения];
- Simple Ratio Index(SRI) - простое отношение ИК-спектра к красному $[SRI=K_{nir}/K_{red}]$;
- Enhanced Vegetation Index (EVI)- усовершенствованный вегетационный индекс $[EVI=2.5*(K_{nir}-K_{red})/(K_{nir}+6K_{red}-7.5K_{blue}+1)]$;
- Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) – атмосферно устойчивый вегетационный индекс $[ARVI=(K_{nir}-2K_{red})/(K_{nir}+(2K_{red}-K_{blue}))]$;
- Sum Green Index (SGI) – суммарный индекс «зелености»
- $[SGI=(K_{nir}-K_{red})/(K_{nir}+K_{red}-K_{blue})]$.

Индексы этой группы отражают общее количество растительности и используются для оценки ее состояния при решении широкого круга задач. Они суммируют и отражают обобщенные параметры таких показателей, как содержание хлорофилла, площадь листовой поверхности, сомкнутость и структура растительного покрова. Вегетационные индексы этой группы хорошо коррелируют с индексом фотосинтетически активной радиации (ФАР) и индексом листовой поверхности (ИЛП). Эти индексы можно определить, используя мультиспектральные аэрокосмические аппараты, у которых есть спектральные каналы в красной (0,60 - 0,75 мкм) и ближней инфракрасной (0,75 - 1,3 мкм) зонах и кото-

рые способны передавать снимки высокого и среднего разрешения [7, 8].

Основное назначение этих индексов – картирование растительного покрова, выявление площадей покрытых и непокрытых растительностью, оценка и мониторинг состояния растительного покрова, оценка продуктивности и урожайности.

Индекс «зелености» можно определить по одной из 6 предложенных формул, в которых учитывается степень поглощения узких полос видимого свете, в частности:

- Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) – нормализованный разностный индекс вегетации растений, определяемый по узким красным спектрам (705 и 750 мкм) $[NDVI_{705}=(K_{750}-K_{705})/(K_{750}+K_{705})]$;
- Modified Red Edge Simple Ratio Index (MRESRI) - модифицированный индекс отношений узких красных спектров поглощения 445, 705 и 750 мкм $[MRESRI=(K_{750}-K_{445})/(K_{750}+K_{445})]$.
- Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (MRENDVI) – модифицированный нормализованный разностный индекс вегетации растений, определяемый по поглощению световой энергии волн 445, 705 и 750 мкм $[MRENDVI_{705}=(K_{750}-K_{705})/(K_{750}+K_{705}-K_{445})]$;
- Vogelmann Red Edge Index 1(VOG1) – индекс Вогельмана 1 для поглощения волн 740 и 720 мкм $[VOG1=K_{740}/K_{720}]$;
- Vogelmann Red Edge Index 2 (VOG2) - индекс Вогельмана 2 для поглощения волн 715, 726, 734 и 747 мкм $[VOG2=(K_{734}-K_{747})/(K_{715}+K_{726})]$;
- Vogelmann Red Edge Index 3 (VOG3) – индекс Вогельмана 3 для поглощения волн 715, 720, 734 и 747 мкм $[VOG3=(K_{734}-K_{747})/(K_{715}+K_{720})]$.

Индексы этой группы также дают представление об общем количестве и состоянии растительности на поверхности земли. Отличие в том, что для расчетов этих индексов учитывается степень отражения световых волн на участке спектра от 0,690 до 0,750 мкм, т. е. рассматривается область ближнего

инфракрасного склона спектральной кривой растительности (red edge) [11].

Использование значений коэффициентов отражения в узких спектральных зонах позволяет с помощью индексов фиксировать даже небольшие изменения состояния растительности. Расчет индексов возможен только по гиперспектральным аэрокосмическим снимкам.

Эффективность использования световой энергии определяется по таким индексам как:

- Photochemical Reflectance Index (PRI) - индекс фотохимического отражения волн 531 и 570 мкм [$PRI = (K_{531} - K_{570}) / (K_{531} + K_{570})$].
- Structure Insensitive Pigment Index (SIPI) – индекс поглощения основными пигментными структурами для волн 445, 680 и 800 мкм [$SIPI = (K_{800} - K_{445}) / (K_{800} + K_{680})$].
- Red Green Index (RGI) – отношение поглощений зеленого и красного света [$RGI = K_{green} / K_{red}$].

Индексы этой группы отражают эффективность, с которой растительность способна использовать поступающий свет для фотосинтеза. Они хорошо коррелируют с эффективностью поглощения фотосинтетически активной радиации, с усвоением углерода и с активностью роста.

Вегетационные индексы учитывают соотношение между различными типами пигментов для оценки общей эффективности использования света. Индексы помогают оценить рост и продуктивность растений, что актуально при решении сельскохозяйственных задач.

Следующая группа расчетных индексов позволяет судить о поглощении азота и синтезе основных органических веществ в растениях:

- Conopy Nitrogen или Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI) - нормализованный разностный азотный индекс растений, определяемый как отношение логарифмов разности и суммы обратных коэффициентов отражения волн среднего диапазона инфракрасного спектра 1510 и 1680 мкм [$NDNI = ((\log(1/K_{1510}) - \log(1/K_{1680})) / ((\log(1/1510) + \log(1/1680))))$].

Этот индекс отражает содержание азота в растительном покрове.

- Normalized Difference Lignin Index (NDLI) – нормализованный разностный индекс содержания лигнина, который также определяется как отношение логарифмов разности и суммы обратных коэффициентов отражения, но уже других волн – 1680 и 1754 мкм [$NDLI = ((\log(1/K_{1754}) - \log(1/K_{1680})) / ((\log(1/1754) + \log(1/1680))))$].
- Cellulose Absorption Index (CAI) – индекс абсорбции света дальнего диапазона инфракрасного света целлюлозой 2000 и 2100 мкм [$CAI = 0.5(K_{2000} + K_{2200}) - K_{2100}$].
- Plant Senescence Reflectance Index (PSRI) – индекс отражения света среднего инфракрасного диапазона связанным («огрубевшим») углеродом растений 500, 680 и 750 мкм [$PSRI = (K_{680} - K_{500}) / K_{750}$]. Эти индексы позволяют учесть общее количество «сухого» углерода в виде лигнина и целлюлозы [8, 10]. Такой углерод в больших количествах присутствует в древесине и в мертвых или сухих растительных тканях. Увеличение этих показателей может отражать процесс «старения» и отмирания растений.

Содержание каротиноидов и антоцианов можно определять по коэффициентам отражения соответствующих волн зеленого и красного спектра:

- Carotenoid Reflectance Index 1 (CRI1) – индекс 1 отражения узкого спектра волн зеленого спектра 510 и 550 мкм [$CRI1 = (1/K_{510}) - (1 - K_{550})$].
- Carotenoid Reflectance Index 2 (CRI2) – индекс 2 отражения волн 510 и 700 мкм [$CRI2 = (1/K_{510}) - (1 - K_{700})$].
- Anthocyanin Reflectance Index 1 (ARI1) – индекс 1 отражения узкого спектра зеленого и красного спектров 550 и 700 мкм [$ARI1 = (1/K_{550}) - (1/K_{700})$].
- Anthocyanin Reflectance Index 2 (ARI2) – индекс 2 отражения тех же волн с поправкой на отражение волны ближнего инфракрасного диапазона 800 мкм [$ARI2 = K_{800}((1/K_{550}) - (1/K_{700}))$].

Расчетные индексы этой группы позволяют выявить стрессовое состояние растений,

так как именно при стрессовом состоянии содержание пигментов может меняться в значительных пределах. Влияние хлорофилла на определяемые индексы не сказывается, так как оно измеряется с использованием индексов «зелености» [5, 8]. Мониторинг поглощения узких спектральных зон позволяет выявить стрессовое состояние растительности еще до того, как оно будет заметно «невооруженным глазом». Это весьма существенно для упреждения развития необратимых отрицательных процессов в самом растении.

Контроль обеспеченности растений водой может быть осуществлен на основании следующих индексов:

- Water Band Index (WBI) – индекс обеспеченности водой, определяемый по поглощению узких полос ближнего инфракрасного спектра 900 и 970 мкм [$WBI=K_{900}/K_{970}$].
- Normalized Difference Water Index (NDWI) - нормализованный разностный водный индекс определяется как отношение разности и суммы коэффициентов поглощения волн 837 и 1241 мкм [$NDWI=(K_{837}-K_{1241})/(K_{837}+K_{1241})$].
- Moisture Stress Index (MSI) – индекс водного стресса определяется как отношение коэффициентов поглощения волн инфракрасного спектра 1599 и 819 мкм [$MSI=K_{1599}/K_{819}$].
- Normalized Difference Infrared Index (NDII) – нормализованный разностный индекс поглощения инфракрасного спектра определяется как отношение разности коэффициентов поглощения волн 819 и 1649 мкм к их сумме [$NDII(K_{819}-K_{1649})/(K_{819}+K_{1649})$].

Перечисленные в этой группе индексы разработаны для оценки содержания влаги в растительном покрове. Для их расчетов используется ближний и средний инфракрасный диапазоны. Индекс PSRI широко применяются для оценки пожароопасности на выделенных территориях [8].

Каждая из перечисленных групп индексов предназначена для оценки одного из свойств растительного покрова. Для конкретных природных условий и различных задач одни индексы из группы могут дать более

точные результаты, чем другие. Все индексы рассчитываются по эмпирическим формулам, которые не всегда могут полно отражать реальную ситуацию на конкретном участке. Определяемые коэффициенты светопоглощения могут изменяться как от вида культуры, плотности стояния растений, так и от фаз развития растений и от растительного ценоза в целом. Поэтому применительно к конкретным условиям все коэффициенты должны корректироваться на основе наблюдений и анализов в полевых опытах.

Сравнивая результаты расчетов индексов с полевыми данными, можно выбрать индекс, максимально точно отражающий исследуемое свойство, существенно повышая точность результатов при последующей обработке.

Космическое ДЗЗ предоставляет исследователям и практикам в области сельскохозяйственного производства широкие возможности для оперативного мониторинга состояния растений и принятия срочных мер по корректировке условий их роста. Свидетельством этому являются перечисленные выше индексы, характеризующие состояние растений. Однако, космическое ДЗЗ имеет ряд существенных недостатков. Самым важным из них является высокая стоимость услуг, оплата которых посильна кредитоспособным отраслям экономики (геологоразведка, добыча нефти и газа, строительство и прокладка энергетических коммуникаций), а нынешнее сельское хозяйство России не обладает, и в ближайшем будущем не будет способным оплачивать такие услуги, хотя очень нуждается в них. Другим недостатком является ограниченная сеть станций ДЗЗ, географическая удаленность их от пользователей такими услугами и большая зависимость предоставления оперативной информации от погодных условий. Облачное небо может перечеркнуть все начатую работу по оперативному контролю состояния растений на полях. В течение одной пасмурной недели могут произойти такие изменения на полях, последствия которых уже будет невозможно компенсировать никакими агротехническими мероприятиями. К таким явлениям относятся «зеленый пожар» и переувлажнение, поражение растений бо-

лезнями и вредителями, масштабное проявление эрозии почв.

Перечисленные недостатки спутникового ДЗЗ устраняются применением легких летательных аппаратов и мобильными отрядами специалистов. Применяя такие летательные аппараты как дельтапланы, парапланы, беспилотные летательные аппараты, гелиевые шары можно оперативно получать аэроснимки и осуществлять оптическое ДЗЗ небольших по площади землепользований, вплоть до усадебных территорий, обслуживать которые региональные центры космической информации воздерживаются. При этом получают снимки с большей четкостью, а спектры поглощения световой энергии регистрируются более уверенно. При обработке получаемой информации используется тот же программный комплекс ENVI, позволяющий рассчитывать до 27 вегетационных индексов, используемых для оценки состояния растительности, содержания пигментов, азота, углерода, воды. По снимкам, где есть только красная и ближняя инфракрасная спектральные зоны, программа предложит рассчитать два индекса – NDVI и RVI. При работе с гиперспектральными оптическими генераторами и детекторами можно рассчитать все 27 индексов.

Оптическое ДЗЗ с помощью малых летательных аппаратов можно осуществлять при любой облачности неба, исключая дождь, грозу и сильные порыва ветра (более 10 м/сек.).

Опыт применения малых летательных аппаратов позволяет Научно-образовательному центру Российского университета дружбы народов оперативно откликаться на запросы малых землепользователей по ДЗЗ их территорий и оперативной оценке агрохимических свойств почв и уровней минерального питания. Детальное полевое обследование почв, растительного покрова и одновременное определение вегетационных индексов дают хороший материал для выработки более надежных диагностических критериев, которые найдут применение в последующей масштабной работе по оптическому ДЗЗ.

Научно-образовательный центр Российского университета дружбы народов

«Центр мониторинга использования и оценки земельных ресурсов и объектов окружающей среды», располагающий самым современным аналитическим оборудованием, успешно выполняет следующие работы:

- Получение с помощью малых летательных аппаратов точных крупномасштабных карт землепользования. При этом не исключается возможность использования услуг региональных центров космической информации. это
- Уточнение генезиса почв.
- Определение границ основных почв и почвенных разностей с точным ГЛОНАСС/GPS позиционированием.
- Определение актуального плодородия почв и грунтов по таким показателям как: гранулометрический состав, реакция среды, емкость поглощения, степень насыщенности основаниями, содержание воднорастворимых солей, гумуса, доступных форм азота, фосфора, калия, магния, серы, бора, меди, цинка и других элементов. Классификация территорий по свойствам почв и растительного покрова и степени пригодности для ведения сельскохозяйственного производства или иного вида пользования.
- Получение геопространственных данных для кадастровой оценки и учета используемых земель.
- Оценка гидрологических условий и планирование использования водных ресурсов.
- Анализ и оценка используемых систем землепользования.
- Определение специализации сельскохозяйственного производства.
- Выделение земель, нарушенных хозяйственной деятельностью и нуждающиеся в реабилитации.
- Топографическое картирование.
- Осуществление постоянного мониторинга состояния и целевого использования земельных и растительных ресурсов.
- Разработка рациональных способов земледеления с учетом почвенно-экологических характеристик конкретных территорий.

Комплексная оценка свойств почв и растительного покрова, мониторинг процессов производится на стационарных точках, что позволят более продуктивно использовать результаты дистанционного зондирования земли и полевых исследований объектов окружающей среды.

Конечной целью всей работы являются производство по запросу землепользователей электронных почвенных, топографических и других тематических карт на обследованных территориях, кадастровая оценка земель и выработка рекомендаций по использованию земель и водных ресурсов.

Литература

1. Антонов В.Н., Сладких Л.А. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ. *Геоматика* №3. 2009.
2. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. *Космические системы дистанционного зондирования Земли*. - М.: Издательство А и Б, 2003. - 296 с.
3. Кравцова В.И. *Космические методы исследования почв*. М.: Аспект Пресс, 2005. 190 с.
4. А.С. Черепанов, Е.Г. Дружинина. *Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы*. *Геоматика* №3. 2009.
5. Evrendilek Fatih, Onder Gulbeyaz. *Deriving Vegetation Dynamics of Natural Terrestrial Ecosystems from MODIS NDVI/EVI Data over Turkey*, www.mdpi.org/sensors
6. Muchoney D., Borak J., Chi, J., Friedl M., Gopal S., Hpdges J., Mjrrrow, N., and Strahler A., 2000, *Application of the MODIS global supervised classification model for vegetation and land cover mapping of Central America*. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1115–1138.
7. Nagendra, H., 2001, *Using remote sensing to assess biodiversity*. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 2377–2400.
8. NDVI – теория и практика. <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>.
9. Tucker, C.J. (1979) 'Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation', *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
10. Tucker, C. J., Holben, B. N., Elgin, J. H., and McMurtrey (1981), *Remote sensing of total dry matter accumulation in winter wheat*, *Remote Sens. Environ.*, 11:171.
11. Walter-Shea, E. A., Privette, J. L., Cornell, D., Mesarch, M. A., and Hays, C. J. (1997), *Relations between spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in alfalfa*, *Remote Sens. Environ.*, 61:162-177.