УДК 544.275.3 DOI: 10.69537/VKNIIRAN.2025.22.3.017

МЕТОД ПЛОТНОСТНОГО АНАЛИЗА СЕКВЕСТРАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

© Исмаилов Висха Супьянович (a), Исмаилова Мялх-Азни Висхаевна (b)

(a) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук

Аннотация. Анализ секвестрационной активности древесной растительности проводился на основе плотностных характеристик зеленого пигмента в жидкости. Были исследованы различные параметры, включая содержание хлорофиллов, их соотношения. Общеизвестно, что плотность зеленого пигмента является важным индикатором здоровья растения и его способности к поглощению углерода. Измерения проводились с использованием вибрационного измерителя плотности жидкостей ВИП-2М, что позволяет точно оценить уровень содержания зеленого пигмента в единице объема. Использование метода плотностного анализа в комплексе с газоанализаторами LI-6800 позволит построить биофизическую карту древесных пород и изучить состояние активности биомассы на данный вегетационный период.

Ключевые слова: ДЗЗ, хлорофилл, секвестрация, фотосинтетическая активность, ВИП-2, БПЛА.

THE METHOD OF DENSITY ANALYSIS OF SEQUESTRATION ACTIVITY OF WOODY VEGETATION

© Ismailov Viskha Supyanovich (a), Ismailova Myalkh-Azni Viskhaevna (b)

(a) Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The sequestration activity of woody vegetation was analyzed based on the density characteristics of the green pigment in the liquid. Various parameters were investigated, including the content of chlorophylls and their ratios. It is well known that the density of green pigment is an important indicator of a plant's health and its ability to absorb carbon. The measurements were carried out using a VIP-2M vibrating liquid density meter, which makes it possible to accurately assess the level of green pigment content per unit volume. Using the density analysis method in

combination with LI-6800 gas analyzers will make it possible to build a biophysical map of tree species and study the state of biomass activity during this growing season.

Key words: remote sensing, chlorophyll, sequestration, photosynthetic activity, VIP-2, UAV.

Введение. В настоящее время можно наблюдать как благоприятные, так и негативные последствия человеческой деятельности для биосферы. Известно, что эффективное взаимодействие с ней зависит от понимания законов ее функционирования и способности рационально использовать ее ресурсы. Живое вещество представляет собой совокупность всех организмов на планете, существующих в определённый момент времени [2]. В этом контексте растительность и лесные массивы занимают ключевые позиции в числе глобальных экологических проблем. Настоящая статья сосредоточена на анализе состояния древесной растительности и вопросах восстановления лесных экосистем.

Согласно исследованиям Института космических исследований (ИКИ) РАН, экосистемы российских лесов ежегодно поглощают около 300 миллионов тонн углерода. Применение беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в сочетании с другими данными позволяет получать точные и актуальные сведения о состоянии в ключевых точках и на их основе проводить обработку спутниковых изображений [7].

Таким образом, полученные данные методом плотностного анализа биомассы подчеркивают значимость мониторинга состояния древесной растительности, так как изменения в содержании хлорофилла могут указывать на экологические трансформации. Это особенно важно в условиях климатических изменений, когда леса подвергаются антропогенному воздействию, открывая новые возможности для исследования влияния растительности на глобальный углеродный баланс.

Методы и принципы исследования. В качестве объекта исследований выбраны образцы (пробы) пород деревьев таких, как: шелковица; грецкий орех; тополь; липа и клен. Результаты анализа помогают в понимании роли древесной растительности в экосистемах и её вклада в углеродный цикл, что важно для разработки стратегий по охране окружающей среды и устойчивому управлению лесными ресурсами.

Одним из самых перспективных методов оперативной оценки состояния растения считается метод индукции флуоресценции хлорофилла (ИФХ). В статье Т.В.Нестеренко, подробно описывается данный метод [2,8,9].

Все вещества и составляющие их атомы находятся в непрерывном колебательном процессе, которые отличаются друг от друга длинами волн. В спектре отраженного света появляются дополнительные линии и по положению в спектре этих линий можно определить энергии молекулярных колебаний, а, следовательно, и химический состав вещества [6]. Каждый элемент периодической системы имеет свой уникальный спектр. Знание значений коэффициента спектральной яркости, например, горных пород расширяет возможности геологического дешифрирования, придает ему большую достоверность [5].

При увядании листового аппарата наблюдается постепенное разрушение его пигментного комплекса. Наиболее устойчивым была пигментная система сосны, быстрее всего разрушались листья осины. Пример изменения содержания хлорофиллов при увядании листьев и хвои некоторых пород деревьев приведен в работе Ворбьева Н.А. [4].

Недостаток питательных веществ объясняется наличием в экосистеме стрессообразующих факторов таких, как калий, азот, фосфор, кальций, железа, магний, недостаток воды и загрязнение почвы растения нефтепродуктами.

В работе Нестеренко Т.В. представлены результаты лабораторных исследований влияния недостатка калия в кукурузе, воды в соевых бобах и приведены спектры флуоресценции этих растений в различных ситуациях [8,9].

Накопление спектральных разностей флуоресценции различной древесной растительности является основной задачей в настоящее время в создания эталонных классификационных характеристик пород деревьев, позволяющих интерпретировать согласно биофизическим особенностям растений. Наиболее перспективным для дистанционного анализа состояния растений с применением ЛИФ-методик является «красная» (600-750 нм) флуоресценция [1].

Основные результаты. Важность мониторинга лесных территорий с применением метода плотностного анализа объясняется простотой и экономичностью сбора данных. Следовательно, данный метод можно использовать в комплексе с другими передовыми технологиями, позволяющих исследовать растительность на фотосинтетическую активность. При этом подразумевается использование контактных методов анализа для создания эталонных плотностей зеленых пигментов пород деревьев (в двух-трех контрольных точках участка), имеющие высокую точность исследуемых параметров древесной растительности. Данный контактный метод позволит оценить достоверность сырых данных полученных при облете БПЛА, оснащенного гипер – и мультиспектральным оборудованием. Очень часто, результаты ДЗЗ отличаются косвенностью спектрометрических данных, здесь особенно важно отметить искажения, получаемые от климатически активных газов (эмиссионные потоки), присутствующие в воздухе. По результатам обработки данных могут появится псевдозоны (характерные для угнетенной растительности) из-за присутствия облака активного газа в воздухе между древесной растительностью и дистанционным сканирующим оборудованием БПЛА. В этой связи проводятся визуальный осмотр в плоть до контактных (местных) измерений процессов фотосинтеза газоанализаторами LI-6800. Таким образом, комплексирование предлагаемого метода плотностного анализа древесной растительности с газоанализаторами позволяет повысить достоверность данных фотосинтеза пород деревьев, находящихся по данным дистанционного зондирования в стрессовом состоянии. Если же данные контактного анализа на жизнестойкость или угнетенное состояния находятся в интервале здоровых градиентов по дискретной шкале растительности, то искажение спектральных данных объясняется эмиссионными скоплениями в воздухе карбоновых и др. активных газов [10].

Тем самым, по характеру свечения (откликов, полученных при облете БПЛА) можно будет классифицировать породы лесного массива с предельной достоверностью путем ввода статистических поправок, полученных по методике плотностного анализа растительности.

Обсуждение. Основная цель исследований заключается в определении плотностей вытяжек из листьев древесной растительности и на этой основе дать оценку секвестрационной активности растениям, показывающим фотосинтетическую энергию биомассы (называемый вегетационным индексом NDVI). Например, недостаток хлорофилла в листьях растений (стрессовое состояние растения) приводит к уменьшению

плотности исследуемого образца. Для вытяжки зеленного пигмента (хлорофилла) из листьев растений в качестве основного экстрагента использовался пищевой этиловый спирт. Неконцентрированную вытяжку, полученную из растительного сырья с помощью жидкого растворителя (этилового спирта), можно рассмотреть в аспекте цветового диапазона шкалы NDVI (в нашем случае от 0,789 г/см^3 до 0,8650 г/см^3). Данный плотностной диапазон занимает секвестрационно значимый участок дискретной шкалы цветности. Так как, плотность этилового спирта находится в пределах 0,798 г/см^3, а плотность вытяжек хлорофилла достигает предела 0,870 г/см^3. Таким образом, экспериментально изучена возможность построения графика полуэмпирической зависимости плотности хлорофилла от секвестрационной активности древесной растительности**.**

Плотности проб измерялись вибрационным измерителем плотности жидкостей ВИП-2М. Опытные работы для данного исследования проводились с использованием образцов пород деревьев таких, как: шелковица; грецкий орех; тополь; липа и клен. Ниже приведены результаты опытных работ, полученные в период вегетации растений от мая месяца до сентября 2023 г. Экспериментальные данные, приведенные в таблице 1, были получены путем экстрагирования зеленого пигмента этиловым спиртом. Вовремя проведении опытных работ спирт постепенно испарялся вслед за этим увеличивался плотность спиртосодержащего раствора.

Когда спирт испаряется, концентрация оставшихся компонентов раствора, таких как хлорофилл, увеличивается. В результате этого увеличение концентрации приводит к повышению плотности раствора. Это явление можно объяснить тем, что плотность раствора зависит от соотношения массы растворенных веществ и объема, который они занимают. Когда спирт испаряется, масса растворителей (например, зеленого пигмента) остается практически неизменной, а объем раствора уменьшается, что и приводит к увеличению плотности.

Экспериментальные данные, полученные в процессе выпаривания этилового спирта из вытяжек шелковицы, грецкого ореха и липы приведены в таблице 1.

Таблица 1

Зависимость плотности от массы экстрагированного раствора хлорофилла

Дата	Порода дерева	Темпертура,^{0}C	Объем, мл	Масса, г	Плотность экстракта хлорофилла, г/см^3
05.05.2023	Шелковица	20	4.7897	3,984	0,8226
		20	4.6146	3,820	0,8278
		20	3.4339	2,890	0,8416
		20	3.2168	2,714	0,8437
		20	**1.7453**	**1,494**	**0,8560**
06.07.2023	Грецкий орех	20	3.8328	3,177	0,8289
		20	3.1058	2,589	0,8336
		20	2.7428	2,293	0,836

Дата	Порода дерева	Темпертура,^{0}C	Объем, мл	Масса, г	Плотность экстракта хлорофилла, г/см^3
		20	2.2592	1,93	0,841
		20	**1.9177**	**1,627**	**0,8484**
		26	3.7986	3,157	0,8311
13.07.2023	Грецкий орех	26	**3.2505**	**2,748**	**0,8454**
		26	2.6719	2,195	0,8215
18.07.2023 г	Липа	26	2.1281	1,754	0,8242
		26	1.6741	1,385	0,8273
		26	**1.2710**	**1,067**	**0,8395**

Из таблицы 1 видно, что по мере выпаривания спирта плотность раствора увеличивается (при t-const), следовательно, при полном его испарении плотность будет стремится к известному пределу плотности хлорофилла ~1,079г/см^3. Цвет листьев растений в значительной степени определяется количеством хлорофилла, который поглощает свет в красной и синей областях спектра, отражая зеленый свет. Чем больше хлорофилла содержится в листьях, тем темнее их оттенок. С другой стороны, растения с меньшей плотностью хлорофилла, такие как клёны, могут иметь более светлые, жёлтые или даже зелёные оттенки. Это также может быть связано с другими пигментами, такими как каротиноиды, которые отражают свет в других спектрах и придают листве соответствующий цвет. Таким образом, содержание хлорофилла влияет на визуальные характеристики листьев и их цвет.

Как известно вытяжки хлорофилла производится методом экстрагирования. "Зеленый пигмент в растворе" — это объемная доля молекул хлорофилла в исследуемом образце, то есть отношение объема молекул хлорофилла, который содержится в растворе, к объему всего раствора. Выходит, что масса образца уменьшается за счет испарения этилового спирта тогда, как молярная масса зеленого пигмента в образце остается неизменной. В конечном итоге, дальнейшая потеря массы образца, приведет к конечной плотности исследуемого хлорофилла. Последствия данного фазового перехода (испарения) — это остаток зеленного пигмента на дне и стенках сосуда [11].

Общеизвестно, что время испарения этилового спирта составляет 140 мин при температуре 20^0 С и давления 760 мм. рт. ст. Перед проведением экспериментальных исследований экстрагент с измельченной зеленой массой находился в открытом сосуде, что способствовало условиям вытяжек зеленого пигмента из растительности и выпариванию спирта из образцов раствора.

Экспериментальные данные на рисунке 1 показывают, что с ростом температуры плотность образца убывает. В целом тепловое поле показывает насколько быстро уменьшается объемная плотность исследуемого образца при увеличении температуры на 1 ^{0}C.

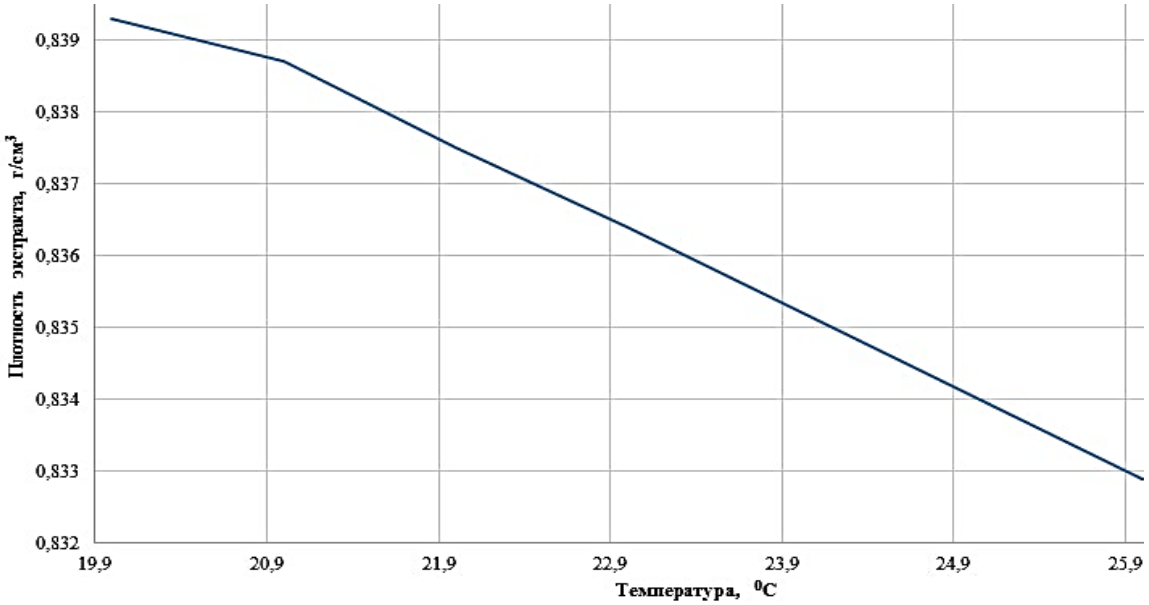

Рис. 1. График зависимости плотности экстрагированного раствора хлорофилла от температуры

Корреляционная характеристика плотности и температуры имеет обратную пропорциональность, а ее температура характеризуется температурным коэффициентом объемного расширения - βt, который измеряется 1/K или 1/°C. При постоянном давлении этот коэффициент показывает относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на 1°C по формулам (1) и (2):

Температурный коэффициент объемного расширения

$$\beta t = \frac{1}{k} \qquad (1)$$

Плотность жидкости при нагревании

$$\rho = \frac{\rho_0}{1+\beta t(t-t_0)} \qquad (2)$$

где, К – температура в Кельвинах; Δt – изменение температуры на 1° С; βt – коэффициент объемного расширения.

Плотность жидкости при нагревании в результате увеличения ее объема уменьшается. Это уменьшение выражается через коэффициент объемного расширения βt по формуле (1).

Из формулы (1) видно, что при увеличении коэффициента объемного расширения βt, а также конечной температуры, плотность заметно уменьшается [2].

Таким образом, при увеличении температуры раствора хлорофилла на шесть единиц уменьшается плотность 0,0064 г/см^3. Данный температурный фактор важно учитывать при изучении секвестрации биомассы, являющейся внутренней энергией излучения нагретого тела.

На рисунке 2 изображена зависимость плотностной характеристики от стандартизованной градиентная шкала цветности NDVI.

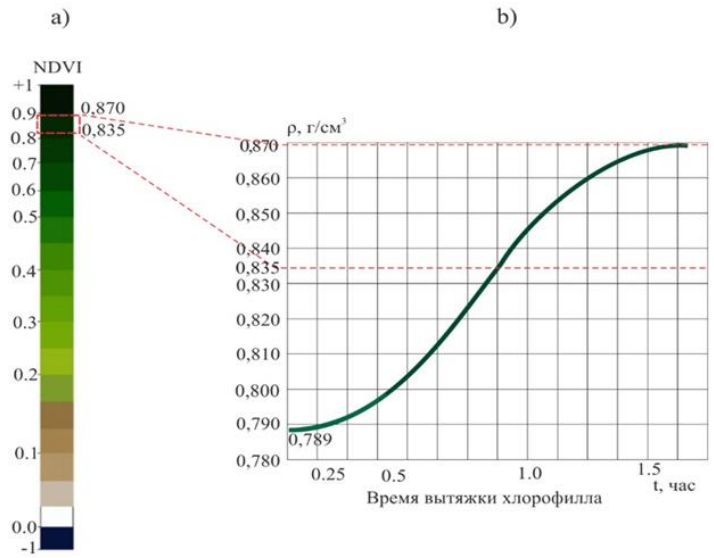

Рис. 2. Полуэмпирическая зависимость градиентной шкалы цветности (а) от вытяжек

Формула расчета вегетационных индексов

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad (3)$$

где, NDVI – Normalized difference vegetation index (нормализованный вегетационный индекс); RED – область красного спектрального диапазона; NIR – ближний инфракрасный (Near Infrared) диапазон электромагнитного спектра.

Стандартизованная градиентная шкала NDVI (Normalized difference vegetation index, нормализованный вегетационный индекс) — это числовой показатель качества и количества растительности на участке поля. Он рассчитывается по спутниковым снимкам и зависит от того, как растения отражают и поглощают световые волны разной длины [12]. Формула (3) расчета вегетационных индексов позволяет косвенно оценить состояние древесной растительности и ее фотосинтетическую активность.

Понятие косвенности количественной оценки растительного покрова заключается в присутствии в воздухе климатически активных газов, молекулярное пространство которых искажают спектры исследуемой биомассы. В связи с этим рассмотрена возможность мониторинга секвестрационной активности растений контактным методом. Для реализации данного метода контактного анализа состояний растительности необходимо отобрать биомассу (2-3 листка) и приготовить экстрагент хлорофилла с указанием координат местности (геолокаций) и температуру во время сбора зелени. Далее по вышеизложенной схеме лабораторного анализа проб можно либо опровергнуть, либо подтвердить фактор местности как депрессивной зоны на экспериментальном участке лесного массива. Такой подход позволит выявить породы деревьев, имеющие аномальные отклонения спектрометрических данных. Данный метод лабораторного анализа биомассы является менее энергозатратным, что обуславливает его преемственность в плане комплексного подхода к решению задач экологического мониторинга.

На рисунке 2 (b) пунктирная красная линия является разделяющей поверхностью между твердой (измельченная растительность) и жидкой (этиловый спирт) фазами. Получается, что показатель плотности (ρ = 0,789, г/см^3 плотность этилового спирта), является начальной точкой процесса вытяжки хлорофилла спиртосодержащим экстрагентом т.е. число 0,789 г/см^3 является началом координат осей плотности (ρ) и времени вытяжек (t). Диапазон экспериментальных исследований (выделенный красным прямоугольником на Рис. 2. а) выбирался из расчета секвестрационной активности древесной растительности, имеющей карбоновую (секвестрационную)значимость. Следовательно, если плотности вытяжек 0,84 г/см^3 и более, то такие показатели, как видно из опытных данных по исследованным породам (шелковица, грецкий орех, липа и др.) соответствуют требованиям секвестрации растительности.

Таким образом, измельченная масса древесной листвы, помещенная в спирт с течением времени от трех и более часов, диффундирует экстрагент молекулами хлорофилла. Такой процесс экстракции зеленного пигмента из листьев сопровождающийся увеличением плотности растворителя показан в таблице 2.

Таблица 2

Полуэмпирический метод зависимости плотности растворенного хлорофилла от NDVI

<table>
<tr><th>Дискретная шкала NDVI</th><th>Плотность экстрагированного раствора (хлорофилла), г/см^3</th><th>Примечание</th><th>Плотность экстрагента, г/см^3</th></tr>
<tr><td>-1.0</td><td rowspan="8">Измельчённая зеленая масса листьев до процесса экстрагирования хлорофилла.</td><td rowspan="8"></td><td rowspan="11">0,789</td></tr>
<tr><td>0.0</td></tr>
<tr><td>0.1</td></tr>
<tr><td>0.2</td></tr>
<tr><td>0.3</td></tr>
<tr><td>0.4</td></tr>
<tr><td>0.5</td></tr>
<tr><td>0.6</td></tr>
<tr><td>0.7</td><td>0.7</td><td>Плотность спирта</td></tr>
<tr><td>0.8</td><td>0,8</td><td rowspan="3">Плотность спирта + хлорофилла</td></tr>
<tr><td>0.9</td><td>0,9</td></tr>
<tr><td>+1.0</td><td>---</td></tr>
</table>

Из таблицы 2 видно, как от плотности экстрагента (равного 0,789 г/см^3) начинается вытяжка зеленого пигмента, рост и увеличение плотности раствора в следствии процесса экстракции хлорофилла показан в зависимости от NDVI по дискретным числам и, соответственно, по значениям плотности проб; показатели плотностей между числами индексов "зеленности" могут быть сколь угодно много выраженных в сотых и тысячных долях. Так были изучены пробы здоровых древесных растений, а также угнетенной и

пожелтевшей биомассы. Естественно полагать, что плотностная кривая имеет тенденцию к понижению на депрессивных участках лесного массива.

Многочисленные данные, полученные весенне-летний вегетационный период с высоким коэффициентом секвестрации, позволяют выделить доверительный диапазон плотностной характеристики вытяжек растений. Входе экспериментальных исследований было обнаружено, что в диапазоне от 0,84-0,87 г/см^3 и более плотности проб соответствуют древесной растительности с высоким потенциалом секвестрации (рис. 1,2). В диапазоне ниже 0,84 г/см^3 – установлено, что растительность имеет меньшую поглотительную способность (CO_2) либо не представляет собой секвестрационную значимость. Таким образом, плотностной диапазон проб имеет полуэмпирическую зависимость от дискретной шкалы цветности (рис. 1,2) в диапазоне ~ 0,80-0,87 г/см^3. Плотность этилового спирта равна 0,789 г/см^3, поэтому в этом пределе может быть только не экстрагированная измельченная растительность (таблица 2) выше – индексы "зелености".

Заключение

В данной работе теоретически изучена возможность искажения гипер - мультиспектральных данных эмиссионными потоками при дистанционной съемке с БПЛА. Преимущества данного подхода заключаются в его экономичности и простоте, что делает его привлекательным для применения в полевых условиях. В период вегетации растений были проведены биофизические эксперименты по изучению плотностной зависимости хлорофилла от фотосинтетической активности. Анализ многомерных экспериментальных данных позволяет сделать заключение о возможности использования полуэмпирической зависимости плотности вытяжек от индексов "зелености. В связи с этим, предлагается провести плотностной анализ содержания хлорофилла в угнетенной листве предположительно в депрессивной зоне, как комплексный подход решения вопроса фотосинтеза леса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов М.Л., Булло О.А., Федотов Ю.В., Городничев В.А. Лазерный метод контроля состояния растений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. 2015. №2 71. С. 71-82
2. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 1989. 261 с.
3. Винников В.А., Каркашадзе Г.Г. Гидромеханика. Издательство Московского государственного горного университета, Москва, 2003 г., 302 стр.
4. Воробьева Н.А., Гришин А.И., Зотикова А.П., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Харченко О.В. Применение эффекта лазерно-индуцированной флуоресценции для дистанционного исследования фотосинтетического аппарата растений // Оптика атмосферы и океана. 2000. № 5. С.539-542.
5. Исмаилов В.С., Насуев А.В. Комплексирование метода мультиспектральной и тепловизионной съемок с традиционной сейсморазведкой // Коллективная монография по материалам XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Москва, 2022. С. 267-271.
6. Исмаилов В.С., Тахаев И.А. О возможности комплексирования лидарной съемки с электроразведкой // Коллективная монография по материалам XI Всероссийской

научно-технической конференции с международным участием. Москва, 2022. С. 272-276.
7. Керимов И. А., Эзирбаев Т.Б. Использование мультиспектральной съемки при наблюдении за состоянием лесного покрова Земли // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12, № 3. – С. 182-194. – DOI 10.46698/VNC.2022.58.33.001.
8. Нестеренко Т. В., Шихов В. Н., Тихомиров А. А. Флуоресцентный метод определения реактивности фотосинтетического аппарата листьев растений // Журнал общей биологии. 2019. Т. 80, № 3. С. 187-199. – DOI 10.1134/S0044459619030060.
9. Федотов Ю.В., Булло О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Дистанционный лазерный флуориметр для обнаружения стрессовых состояний растительности // Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 01. С. 1–13. DOI:10.24108/rdopt.0117.0000082.
10. Биндер, В.Д., Филдер, П., Мохаммед, Г.Х. и др. Применение флуоресценции хлорофилла для оценки качества запасов с помощью различных типов флуорометров. New Forests 13, 63-89 (1997). https://doi.org/10.1023/A:1006513720073
11. Нил Р. Бейкер, Ева Розенквист, Применение флуоресценции хлорофилла для улучшения стратегий производства сельскохозяйственных культур: исследование будущих возможностей, Журнал экспериментальной ботаники, Том 55, Выпуск 403, Август 2004, Страницы 1607-1621, https://doi.org/10.1093/jxb/erh196
12. Swoczyna T, Kalaji HM, Bussotti F, Mojski J, Pollastrini M. Экологический стресс - что мы можем узнать из анализа флуоресценции хлорофилла a в древесных растениях? Обзор. Front Plant Sci. 2022 Dec 14;13:1048582. doi: 10.3389/fpls.2022.1048582. PMID: 36589121; PMCID: PMC9795016.

REFERENCES

1. Belov M.L., Bullo O.A., Fedotov Yu.V., Gorodnichev V.A. Laser method of plant condition control // Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Ser. “Instrumentation”. 2015. №2 71. C. 71-82
2. Vernadsky V.I. Biosphere and Noosphere. Moscow: Nauka, 1989. 261 c.
3. Vinnikov V.A., Karkashadze G.G. Hydromechanics. Moscow State Mining University Publishing House, Moscow, 2003. Moscow State Mining University, Moscow, 2003, 302 pp.
4. Vorobyeva N.A., Grishin A.I., Zotikova A.P., Matvienko G.G., Romanovsky O.A., Kharchenko O.V. Application of the effect of laser-induced fluorescence for remote study of photosynthetic apparatus of plants // Optics of the atmosphere and ocean. 2000. № 5. C.539-542.
5. Ismailov V.S., Nasuev A.V. Complementing the method of multispectral and thermal imaging surveys with traditional seismic survey // Collective monograph on the materials of XI All-Russian scientific and technical conference with international participation. Moscow, 2022. C. 267-271.
6. Ismailov V.S., Takhaev I.A. About Possibility of combining lidar survey with electrical prospecting // Collective monograph. monograph on materials of XI All-Russian scientific and technical conference with international participation. Moscow, 2022. C. 272-276.

7. Kerimov I. A., Ezirbaev T.B. Use of multispectral imaging in observation of the Earth's forest cover // Geology and Geophysics of Southern Russia. - 2022. - T. 12, № 3. - C. 182-194. - DOI 10.46698/VNC.2022.58.33.001.
8. Nesterenko T. V., Shikhov V. N., Tikhomirov A. A. Fluorescent method for determining the reactivity of the photosynthetic apparatus of plant leaves // Journal of General Biology. 2019. T. 80, № 3. C. 187-199. - DOI 10.1134/S0044459619030060.
9. Fedotov Yu.V., Bullo O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Remote laser fluorimeter for the detection of vegetation stress states // Radiooptics. Bauman Moscow State Technical University. Electron. journal. 2017. no. 01. p. 1-13. DOI:10.24108/rdopt.0117.0000082.
10. Binder, W.D., Fielder, P., Mohammed, G.H. et al. Applications of chlorophyll fluorescence for stock quality assessment with different types of fluorometers. New Forests 13, 63–89 (1997). https://doi.org/10.1023/A:1006513720073
11. Neil R. Baker, Eva Rosenqvist, Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities, Journal of Experimental Botany, Volume 55, Issue 403, August 2004, Pages 1607–1621, https://doi.org/10.1093/jxb/erh196
12. Swoczyna T, Kalaji HM, Bussotti F, Mojski J, Pollastrini M. Environmental stress - what can we learn from chlorophyll a fluorescence analysis in woody plants? Pregled. Front Plant Sci. 2022 Dec 14;13:1048582. doi: 10.3389/fpls.2022.1048582. PMID: 36589121; PMCID: PMC9795016.