

Экология и природопользование

Кучин Л.С.

Научная статья

УДК: 550.4: 504.054

doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-160-173

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНАЯ СЪЕМКА НА ПЛАТФОРМЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА РАЙОНОВ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ АККУМУЛЯЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Леонид Сергеевич Кучин

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

kleond@bk.ru

Аннотация. Район исследования располагается на участке газонефтяного месторождения в верховьях р. Ясыл. В связи с распространением карстовых процессов на исследуемой территории формируются природно-техногенные аккумуляции углеводородов. Продолжается работа по выявлению нефтепромыслового техногенеза методами дистанционного зондирования Земли. По данным газогеохимической съемки построены карты распределения газов подгумусового горизонта (метана, углекислого газа, летучих органических соединений, углеводородных газов C_1-C_5). Наиболее распространенными являются газогеохимические аномалии, связанные с углеводородными газами. Все аномалии, но особенно те, которые связаны с углеводородными газами, указывают на накопление углеводородов, имеющих отношение к нефтегазовому промыслу. На их основе проведена мультиспектральная беспилотная аэрофотосъемка районов природно-техногенной аккумуляции. Выявлены шесть типов газогеохимических аномалий с максимальными концентрациями газов и их пространственное распределение. По данным мультиспектральной беспилотной аэрофотосъемки в программе DJI Terra построены ортофотопланы вегетационных индексов (NDVI, GNDVI, LCI, NDRE). Проведена дистанционная оценка связи вегетации лесных и луговых экосистем с концентрациями газов в подгумусовом горизонте. Взаимосвязь между вегетационными индексами и концентрацией газов в подгумусовом слое является нелинейной и определяется комплексом биогеохимических процессов, происходящих в наземных и подземных биогеоценозах карстового массива. Газогеохимические аномалии с высокими концентрациями углеводородных газов и лёгких органических соединений наиболее отчётливо проявляются в значениях индексов, полученных с использованием канала Red Edge. Для всех типов газогеохимических аномалий в лесных экосистемах свойственен рост значений вегетационных индексов. Для луговых сообществ при сравнении фоновых и аномальных значений газов выявлено снижение значений вегетационных индексов

Ключевые слова: беспилотная аэрофотосъемка, вегетационные мультиспектральные индексы, газогеохимическая съемка, техногенез, газонефтяное месторождение

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 24-17-20025, <https://rscf.ru/project/24-17-20025/>.

Для цитирования: Кучин Л.С. Мультиспектральная съемка на платформе беспилотного летательного аппарата районов природно-техногенной аккумуляции углеводородов // Географический вестник = Geographical bulletin. 2025. № 1 (72). С. 160–173. doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-160-173

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-160-173

MULTISPECTRAL SURVEY OF HYDROCARBONS NATURAL AND MAN-MADE ACCUMULATION AREAS USING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Leonid S. Kuchin

Perm State University, Perm, Russia

kleond@bk.ru

Abstract. The research area is located on the site of a gas and oil field in the upper reaches of the Yasyly River. Due to the spread of karst processes in the studied area, natural and man-made accumulations of hydrocarbons are formed. There is ongoing work done to identify oilfield technogenesis by remote sensing methods. Based on the data of a gas-geochemical survey, maps of the distribution of subhumus horizon gases (methane, carbon dioxide, volatile organic compounds, and C_1-C_5 hydrocarbon gases) were constructed. The most common are gas-geochemical anomalies associated



© 2025 Эта работа Кучина Л.С. лицензирована по CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Экология и природопользование
Кучин Л.С.

with hydrocarbon gases. All anomalies, especially those related to hydrocarbon gases, indicate the accumulation of hydrocarbons related to the oil and gas industry. Based on them, multispectral unmanned aerial photography of areas of natural and man-made accumulation was carried out. Six types of gas-geochemical anomalies with maximum gas concentrations and their spatial distribution have been identified. According to the multispectral unmanned aerial photography data, orthophotoplans of vegetation indices (NDVI, GNDVI, LCI, NDRE) were built in the DJI Terra program. A remote assessment of the relationship between the vegetation of forest and meadow ecosystems and the concentrations of gases in the subhumus horizon was performed. The relationship between vegetation indices and the concentration of gases in the subhumus layer is nonlinear and is determined by a complex of biogeochemical processes occurring in terrestrial and underground biogeocenoses of the karst massif. Gas-geochemical anomalies with high concentrations of hydrocarbon gases and light organic compounds are most clearly manifested in the values of the indices obtained using the Red Edge channel. All types of gas-geochemical anomalies in forest ecosystems are characterized by an increase in the values of vegetation indices. For meadow communities, a decrease in the values of vegetation indices was revealed when comparing background and abnormal gas values.

Keywords: unmanned aerial photography, vegetation multispectral indexes, gas-geochemical survey, technogenesis, gas and oil field

Funding. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation and the Perm region No. 24-17-20025, <https://rscf.ru/project/24-17-20025/>.

For citation: Kuchin, L.S. (2025). Multispectral survey of hydrocarbons natural and man-made accumulation areas using an unmanned aerial vehicle. *Geographical Bulletin*. No. 1 (72). Pp. 160–173. doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-160-173

Введение

Нефтепромысловое воздействие может негативно влиять на природную среду и вызвать деградацию растительного покрова [1]. Для оптимизации оценки деградации растительности рекомендуется применять данные дистанционного зондирования (ДЗЗ). Как правило, изучается площадь измененного растительного покрова в ходе обустройства инфраструктуры месторождений нефти [14]. Особенно активно для оценки состояния растительности применяются вегетационные индексы, полученные на основе мультиспектральной съемки [18]. Для оптимизации мониторинга экологической безопасности на нефтегазовых месторождениях часто предлагается использовать беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [24].

Существует успешный опыт проведения оценки поверхностных проявлений нефтепромыслового техногенеза по данным ДЗЗ, в том числе с применением БПЛА [7]. Однако необходима комплексная оценка, особенно воздействия на экосистемы углеводородных газов, мигрирующих из нефтеносных пластов на поверхность. Определенность влияния углеводородных газов на фотосинтез растений и, соответственно, возможность диагностировать с помощью ДЗЗ на базе БПЛА остается сложной и дискуссионной задачей.

Процесс добычи нефти и газа сопровождается попаданием в окружающую среду органических и минеральных техногенных веществ. Одними из таких веществ является углеводороды, выделяющиеся в атмосферу при продувках скважин, утечках или стравливании из трубопроводов, в процессе утечек из негерметичных технологических установок, а также при испарении из резервуаров товарных парков и очистных сооружений [4]. Поступление углеводородов может быть связано еще и с изменением внутриволнового давления и выходить при разгерметизации нефтегазоносных пластов, в том числе при бурении скважин [13].

Одним из широко используемых методов выявления очагов нефтезагрязнения геологической среды является газогеохимический метод исследований. Основным критерием оценки уровня загрязнения почв, грунтов и вод выступает содержание «нефтепродуктов». В качестве индикаторов мощных источников углеводородов предлагаются использовать суммарное содержание углеводородов C_1-C_5 (УВГ) [2]. Поскольку увеличение содержания УВГ может быть вызвано биогенной генерацией, то считается, что лучше применять газогеохимический метод с учетом других нефтяных углеводородов [17]. Поэтому помимо содержания УВГ в воздухе под гумусовым горизонтом измеряется также содержание метана, диоксида углерода и летучих органических соединений (ЛОС). Данная методика показывает высокую информативность при картировании приповерхностных очагов нефтезагрязнения, связанных с утечками и аварийными разливами из поверхностных объектов хранения нефтепродуктов [2].

Основные задачи исследования:

1. Построение карт ареалов содержания газов подгумусового горизонта (CH_4 , CO_2 , ЛОС, УВГ) с последующим выявлением и типизацией газогеохимических аномалий;
2. Проведение мультиспектральной ортотофотосъемки выявленных районов природно-техногенной аккумуляции углеводородов;
3. Получение по данным мультиспектральной ортотофотосъемки значений вегетационных индексов (NDVI, GNDVI, LCI, NDRE);
4. Оценка по данным ДЗЗ связи вегетации лесных и луговых экосистем с концентрациями газов CH_4 , CO_2 , ЛОС, УВГ в подгумусовом горизонте.

Экология и природопользование
Кучин Л.С.

Материалы и методика

Район исследования расположен в юго-восточной части Пермского края в верховьях реки Ясыл. Бассейн р. Ясыл расположен на территории газонефтяного месторождения в Ординском районе Пермского края (рис. 1). Территория относится к Иренскому карстовому району преимущественно гипсового и карбонатно-гипсового карста. В пределах долины Ясыльского лога и примыкающих территорий расположено свыше 1300 поверхностных карстовых форм. Наиболее многочисленны карстовые воронки [11, 21].

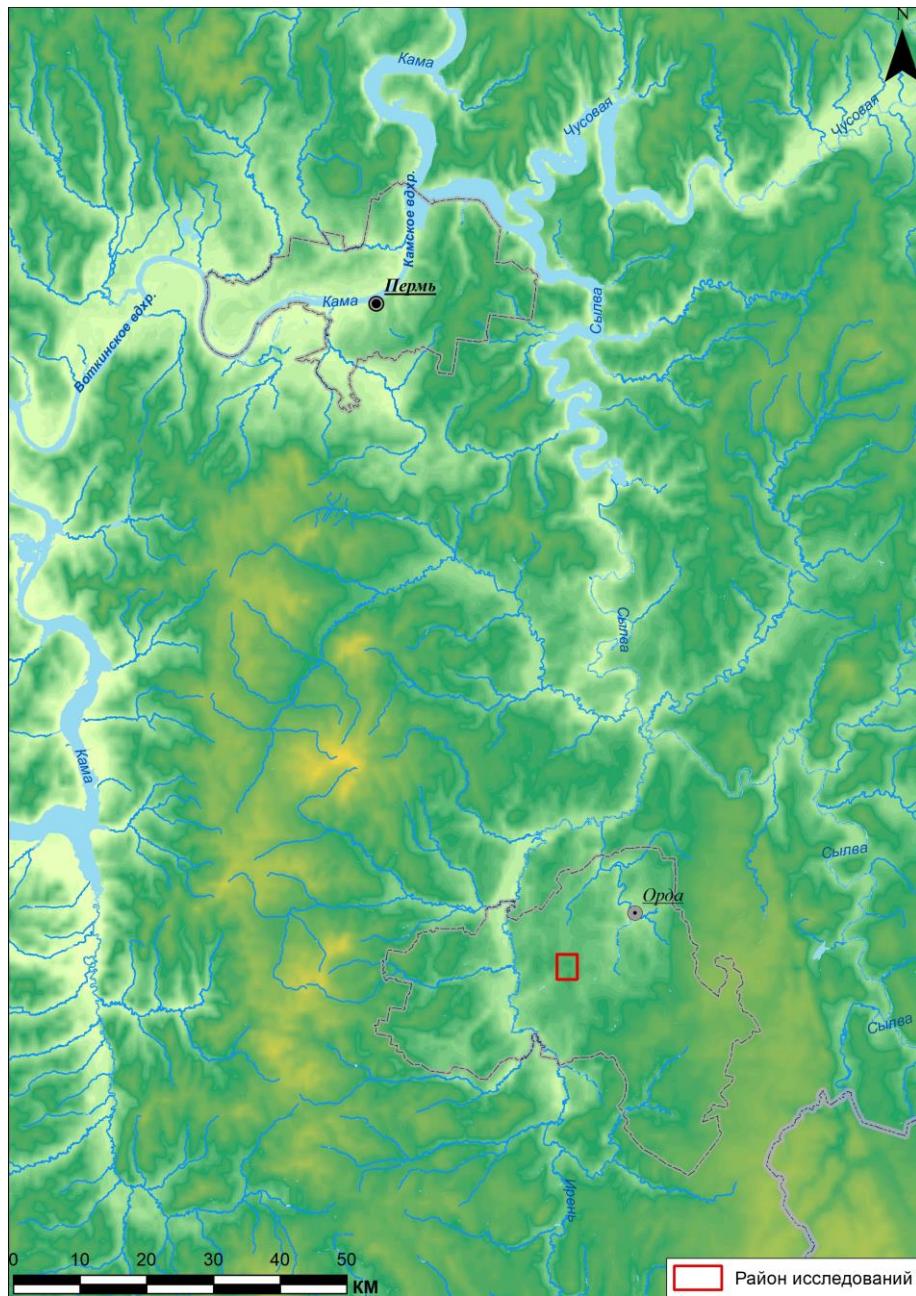


Рис 1. Район исследования природно-техногенной аккумуляции углеводородов
Fig. 1. Study area of natural and man-made accumulation of hydrocarbons

В районе исследования преобладают дерново-подзолистые и аллювиальные кислые почвы. Территория исследования находится в зоне широколиственно-пихтово-еловых (подтаежных) лесов, в Кунгурском лесостепном природном районе, характеризующемся сочетанием зональных лесных, экстразональных степных и остеиненных лесных, интразональных пойменных и антропогенных фитоценозов [6].

Экология и природопользование
Кучин Л.С.

Газогеохимическое обследование проведено лабораторией геоэкологии горнодобывающих регионов ГИ УрО РАН в 2018 г. Данные для оценки получают при помощи газоанализатора ECOPROBE-5, который предоставляет информацию о концентрации метана (CH_4), диоксида углерода (CO_2), летучих органических соединениях (ЛОС) и суммарного содержания углеводородов $\text{C}_1\text{-C}_5$ (УВГ) в газе подгумусового горизонта [3, 4].

По таблице с координатами точек газогеохимического апробирования формировался слой точек, содержащий атрибутивную таблицу концентрации подпочвенных газов. Затем при помощи инструмента «Естественная окрестность» (ArcMap, ArcGIS, ESRI) формировались растровые слои, содержащие распределение подпочвенных газов (CH_4 , CO_2 , ЛОС, УВГ).

Определялась область газогеохимических аномалий по максимальному содержанию определяемых газов. Контрольная площадь вычислялась по минимальным концентрациям, после чего на данных территориях проводилась съемка БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral. Ортотофотосъемка проводилась в июле 2024 г. на площади 175,94 га. По результатам съемки в программе DJI Terra [15] построены ортотопланы в видимом спектре, а также индексах NDVI, GNDVI, LCI, NDRE. Разрешение полученных ортотопланов составило 14 см/пикс.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – один из наиболее широко используемых мультиспектральных индексов, отображающий качество биопродуктивности растений. Принцип его работы основан на соотношении красного и ближнего инфракрасного спектральных диапазонов [20].

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{Red})}{(\text{NIR} + \text{Red})}, \quad (1)$$

где NIR – ближний инфракрасный (840 нм); Red – красный (650 нм).

GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) – индекс, отображающий распределение концентрации хлорофилла и скорости фотосинтеза в листьях и хвое растений. Он может применяться для выявления стрессового состояния у растительности. Выявлено, что усыхание и пожелтение листовой пластины отображается в повышении отражения в красной и снижении в зеленой области спектра снимка. Исходя из формулы, GNDVI позволяет оценить процессы угнетения растительности и выразить их в снижении значения [9].

$$\text{GNDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Green}}{\text{NIR} + \text{Green}}, \quad (2)$$

где NIR – ближний инфракрасный (840 нм); Green – зеленый (560 нм).

LCI (Leaf Chlorophyll Index) – индекс растительности, который использует спектральные характеристики отражения красной полосы и ближней инфракрасной полосы для отображения различий в содержании хлорофилла [23].

$$\text{LCI} = \frac{\text{NIR} - \text{RE}}{\text{NIR} + \text{Red}}, \quad (3)$$

где NIR – ближний инфракрасный (840 нм); RE – красный край (730 нм), Red – красный (650 нм).

NDRE (Normalized Difference Red Edge Index) – мультиспектральный индекс, ориентированный на определение достаточности азота в листьях за счет измерения активности фотосинтеза [22, 16].

$$\text{NDRE} = \frac{(\text{NIR} - \text{RE})}{(\text{NIR} + \text{RE})} \quad (4)$$

Вычисление средних значений мультиспектральных индексов осуществлялось в программе ArcMap (ArcGIS, ESRI) с применением инструмента «Зональная статистика». Значения рассчитывались по полигонам, выделенным на ортотоплане, для зон газогеохимических аномалий и фоновых участков. Таким же образом производилось вычисление средних значений индексов по 84 площадкам по 900 м^2 каждая. Площадки выделялись в пределах полученных ортотопланов (рис. 2).

В программе Microsoft Excel проводилась обработка средних значений мультиспектральных индексов и средних концентраций подпочвенных газов, а также построение диаграмм и графиков значений мультиспектральных индексов на выделенных участках.

Экология и природопользование

Кучин Л.С.

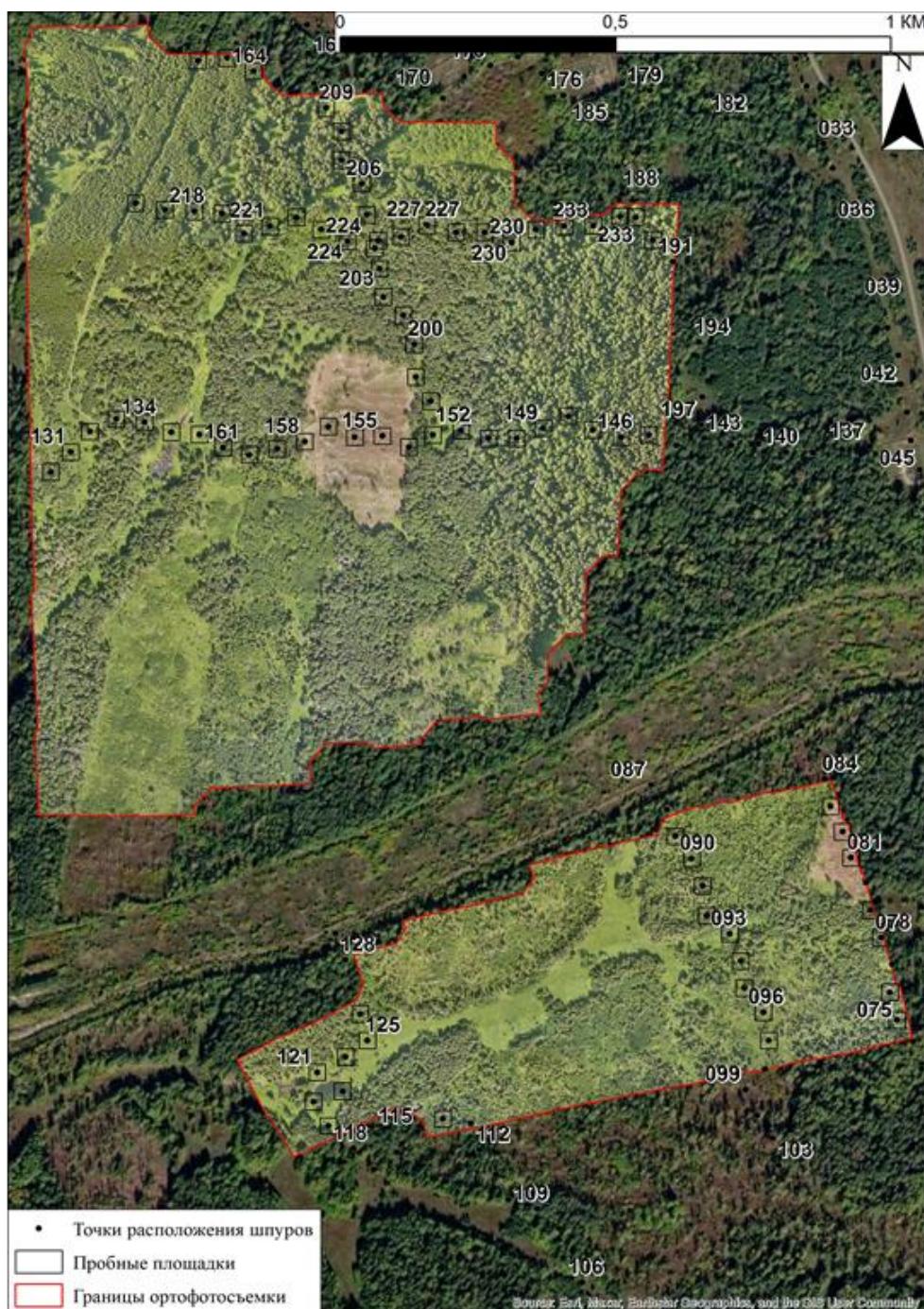


Рис. 2. Схема газогеохимического обследования и мультиспектральной съемки БПЛА
 Fig. 2. Scheme of the gas-geochemical survey and multispectral UAV photography

Результаты и их обсуждение

На основании измеренного содержания подпочвенных газов получены значения содержания газов для 86 площадок. Из этих площадок исключены площадки, содержащие водные объекты и вырубки, поскольку для данных объектов значения вегетационных индексов минимальны и создают большой шум для оценки вегетации растительных сообществ. Для выявления общей тенденции изменения содержания газов и значений мультиспектральных индексов для лесных и луговых экосистем построены графики (рис. 3–6).

Экология и природопользование
Кучин Л.С.

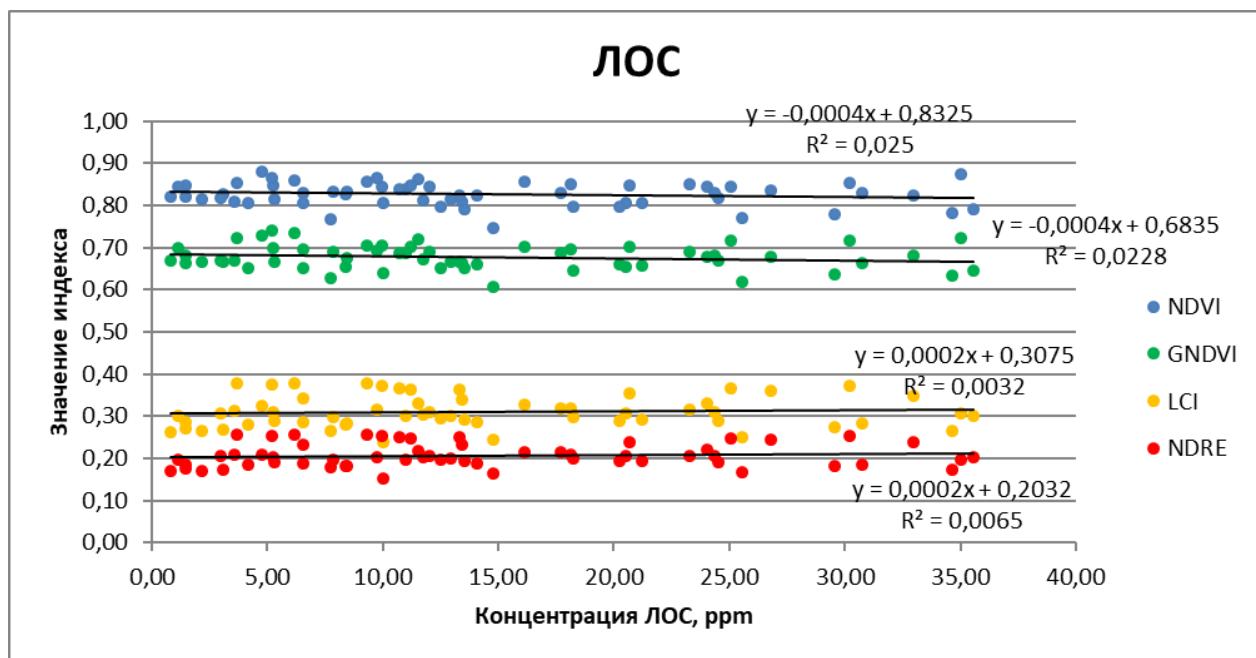


Рис. 3. Мультиспектральные вегетационные индексы и концентрации ЛОС в подгумусовом горизонте почвы
Fig. 3. Multispectral vegetation indices and VOCs concentrations in the subhumus horizon

На графике (рис. 3), показано, что существует тренд по снижению вегетационных индексов NDVI и GNDVI при увеличении концентрации ЛОС. LCI и NDRE имеют маловыраженный тренд на увеличение.

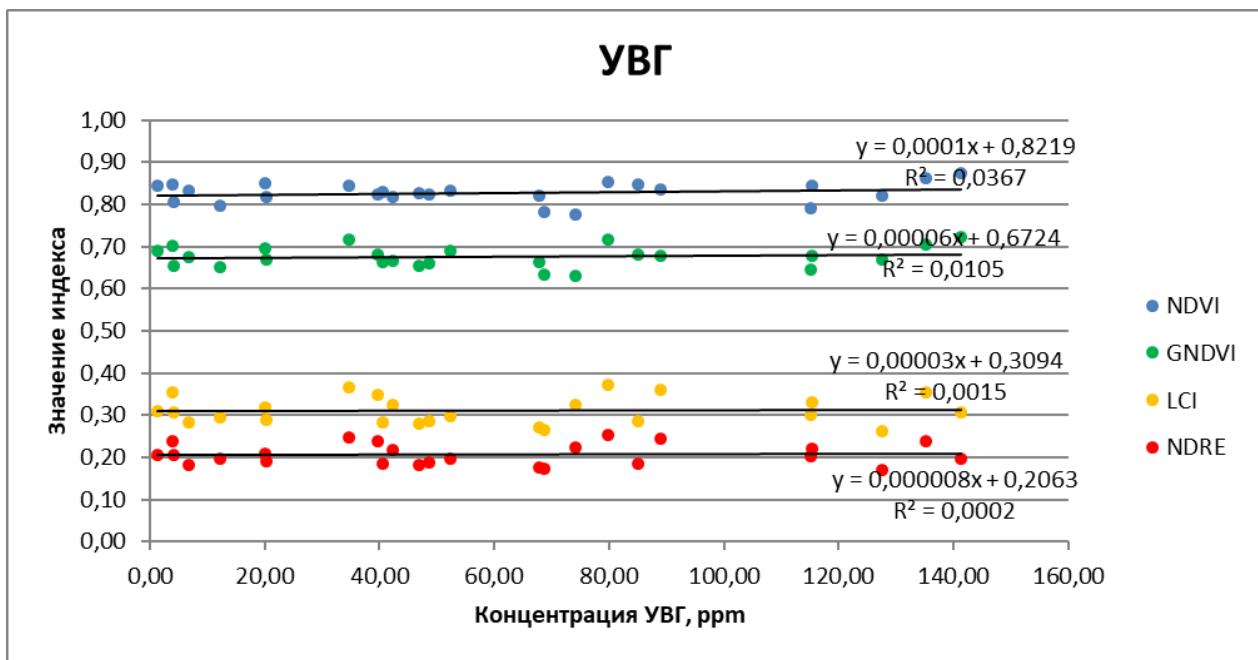


Рис. 4. Мультиспектральные вегетационные индексы и концентраций УВГ в подгумусовом горизонте почвы
Fig. 4. Multispectral vegetation indices and concentrations of HCGs in the subhumus horizon

Коэффициент аппроксимации линий тренда на графике (рис. 4) демонстрирует отсутствие линейной зависимости. Прослеживается тренд роста значений мультиспектральных индексов при росте концентраций УВГ.

Экология и природопользование
Кучин Л.С.

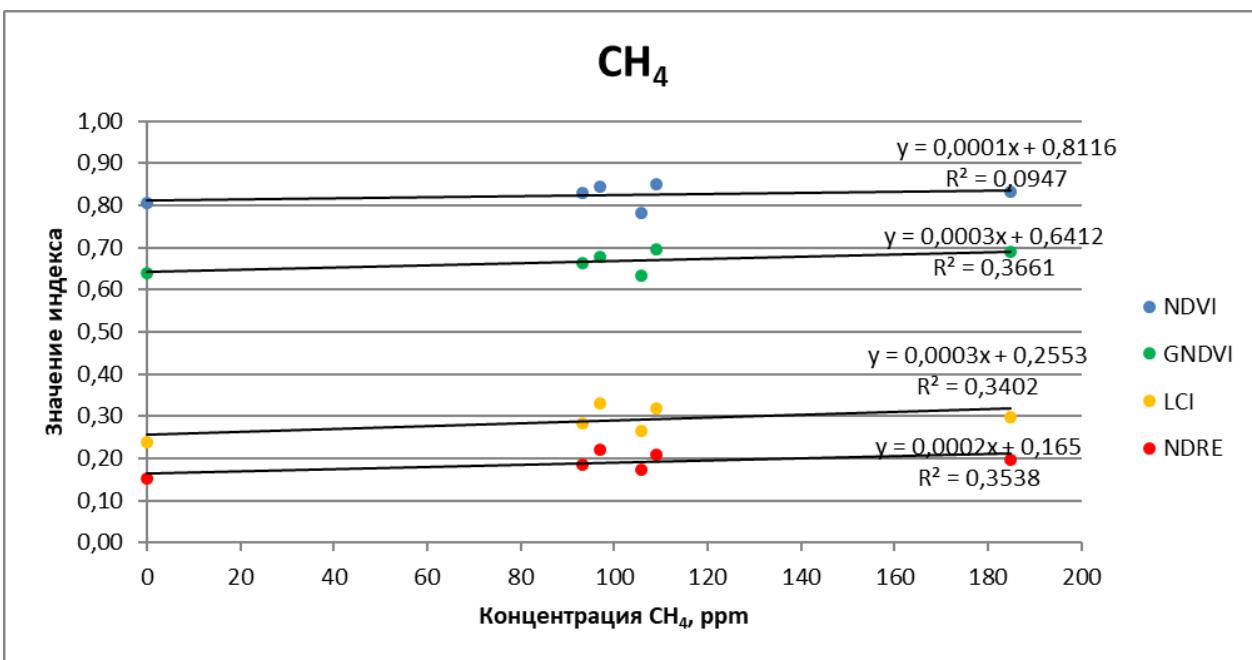


Рис. 5. График зависимости значений мультиспектральных вегетационных индексов и концентраций CH_4 в подгумусовом горизонте почвы

Fig. 5. The dependence of the multispectral vegetation indices and CH_4 concentrations in the subhumus horizon

По графику (рис. 5) наблюдается тренд незначительного роста значений всех мультиспектральных индексов относительно концентрации метана. Распределение графиков нелинейное.

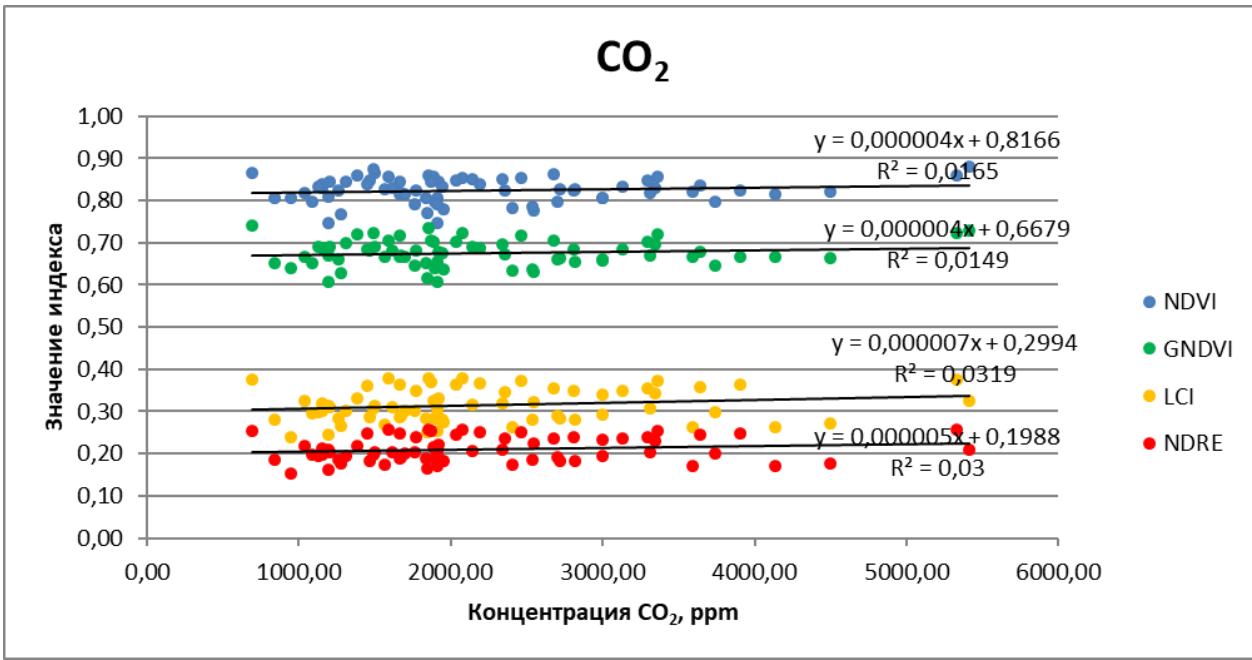


Рис. 6. График зависимости значений мультиспектральных вегетационных индексов и концентраций CO_2 в подгумусовом горизонте почвы

Fig. 6. The dependence of the multispectral vegetation indices and CO_2 concentrations in the subhumus horizon

По графику (рис. 6) заметен тренд роста значений индексов относительно концентрации CO_2 . При этом коэффициент аппроксимации линии тренда (R^2) свидетельствует об отсутствии линейного распределения значений, поскольку не превышает 0,03.

Как видно из графиков (рис. 3–6), выявить общий тренд влияния содержания концентрации подпочвенных газов на значения мультиспектральных вегетационных индексов невозможно. Разброс значений может быть вызван

Экология и природопользование
Кучин Л.С.

разным видовым составом растительности [5]. Поэтому с целью выявления возможного различия между аномальными (максимальными) концентрациями и фоновыми (минимальными) было решено оценить значения этих областей для лесных и луговых экосистем. Характеристика распределения подпочвенных газов (CH_4 , CO_2 , ЛОС, УВГ) строилась на основании их максимальных концентраций в шпуре. Всего был апробирован 231 шпур. Распределение подпочвенных газов на исследуемой территории представлено на рис. 7.

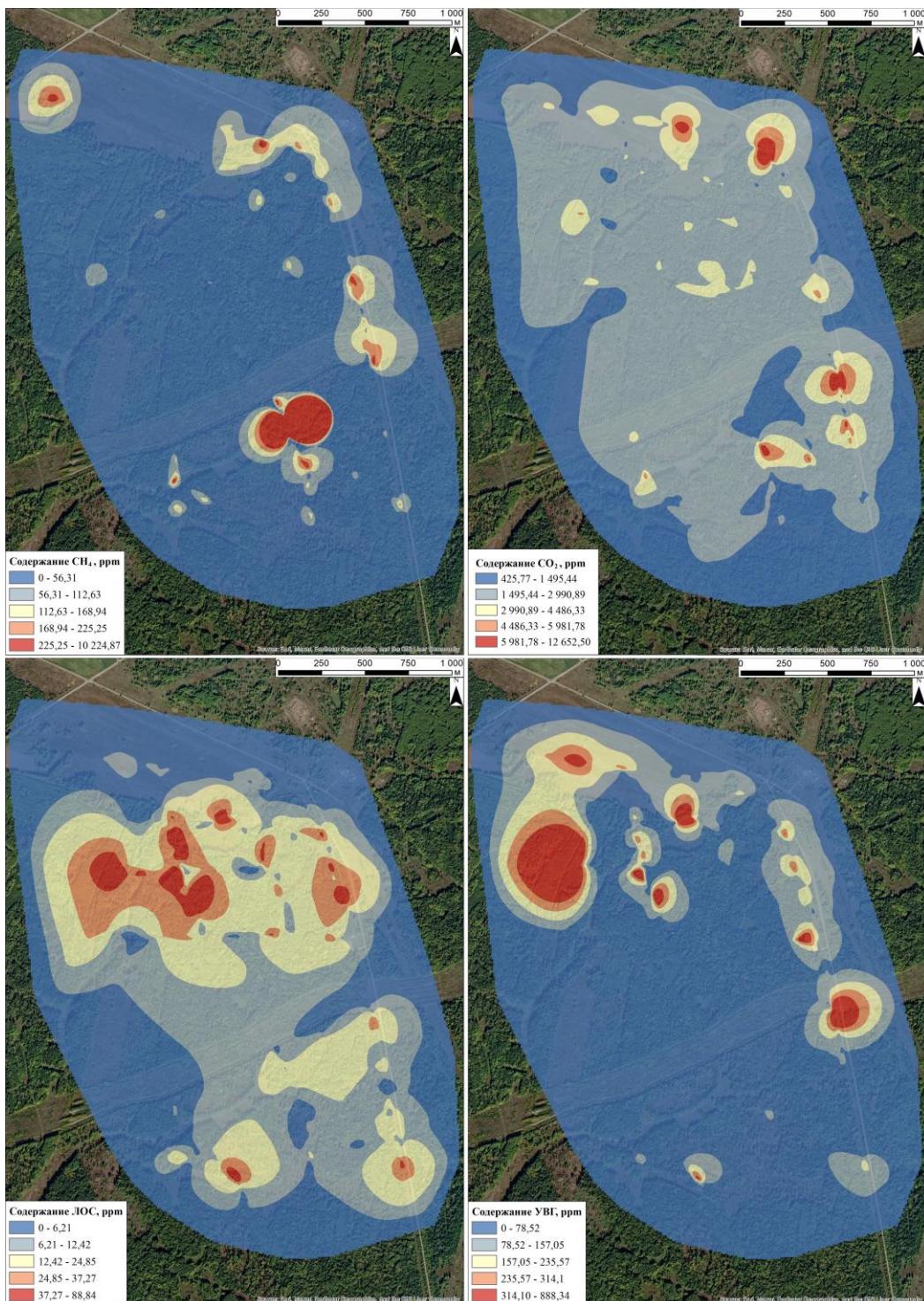


Рис. 7. Распределение содержания газов в подгумусовом горизонте почвы

Fig. 7. Distribution of gas content in the subhumus horizon

Наиболее высокие относительно фона значения характерны для ЛОС. Преобладающие по площади фоновые концентрации выявлены для CH_4 и УВГ в диапазоне от 0–56,31 ppm и 0–48,52 ppm соответственно. Повышенные

Экология и природопользование

Кучин Л.С.

концентрации газов сосредоточены в основном на севере и востоке исследуемой территории, что может быть связано с расположением нефтепромысловых объектов (скважин, нефтепроводов).

По данным распределения были выявлены зоны максимальной концентрации подпочвенных газов, которые представляют собой газогеохимические аномалии, всего выявлено 32 ареала газогеохимических аномалий (рис. 8).

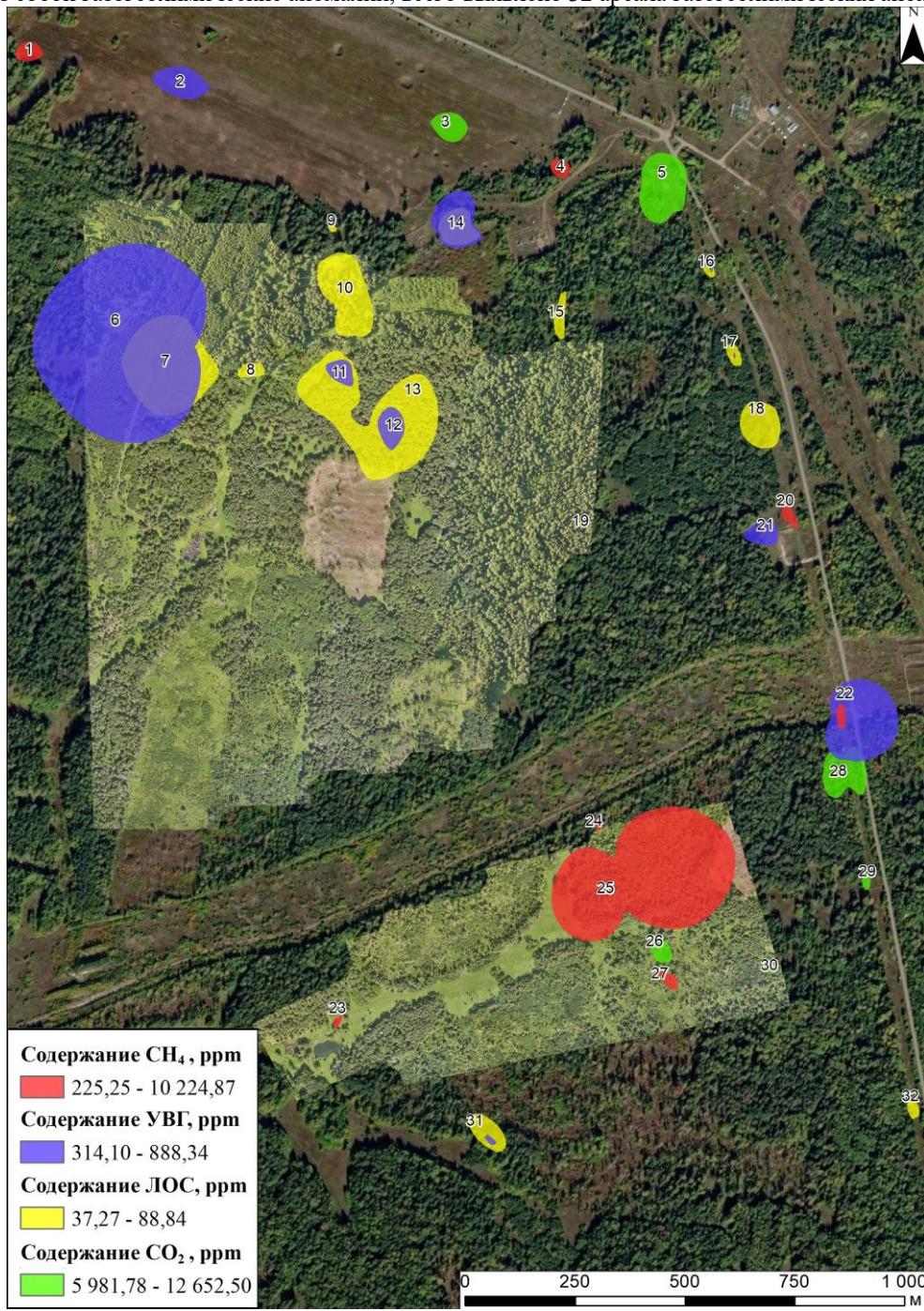


Рис. 8. Распределение газогеохимических аномалий. 1–32 – ареалы газогеохимических аномалий
Fig. 8. Distribution of gas-geochemical anomalies. 1–32 – areas of gas-geochemical anomalies

На территории исследования выделено шесть типов газогеохимических аномалий (табл.). Газогеохимические аномалии в северо-восточной части исследуемой территории связаны с нефтепромысловыми объектами. Наибольшая часть газогеохимических аномалий смешанного типа (УВГ и ЛОС) располагается в лесном массиве на севере, северо-западе района обследования. Крупная метановая газогеохимическая аномалия расположена на юге.

По наличию и сочетанию газов выявленные газогеохимические аномалии можно типизировать (табл.).

Экология и природопользование
Кучин Л.С.

Таблица

Типы газогеохимических аномалий
Types of gas-geochemical anomalies

№	Тип газогеохимической аномалии	Номера ареалов на карте (рис. 8)	Содержание газа, ppm	Площадь, га	Доля площади, %
1	Высокие концентрации УВГ	2, 6, 21	314,10–888,34	14,68	36,63
2	Высокие концентрации ЛОС	8, 9, 10, 13, 15, 18, 19, 32	37,27–88,84	8,24	20,56
3	Высокие концентрации CH ₄	1, 4, 20, 23, 24, 25, 27	225,25–10224,87	9,51	23,73
4	Высокие концентрации CO ₂	3, 5, 26, 28, 29, 30	5981,78–12652,50	2,98	7,44
5	Высокие концентрации УВГ и ЛОС одновременно	7, 11, 12, 14, 16, 17, 31	314,10–888,34 и 37,27–88,84	4,56	11,38
6	Высокие концентрации УВГ и CH ₄ одновременно	22	314,10–888,34 и 225,25–10224,87	0,11	0,27

Из шести типов выделенных газогеохимических аномалий четыре вызваны превышением по содержанию только одного газа. Для двух типов аномалий характерно сочетание двух газов: УВГ и ЛОС; УВГ и CH₄.

Основная доля аномалий с превышением УВГ сконцентрирована на севере (рис. 8). Данные геохимические аномалии занимают наибольшую долю площади обследованного района. Небольшая аномалия такого же типа расположена на востоке рядом с площадкой скважин, неподалеку от нее выделена метановая аномалия.

Аномалии с высоким содержанием ЛОС и УВГ свойственны лесному массиву на севере (рис. 8). Данная особенность распространения может быть вызвана миграцией нефтепродуктов по зонам трещиноватости из нефтеносных пластов. Миграция может быть причиной нефтезагрязнения ключей в верховьях р. Ясыл, поскольку газогеохимические аномалии приурочены к берегам данной реки, и в периоды паводков нефтепродукты разгружаются в родники вместе с грунтовыми водами. Подобные процессы были выявлены на других нефтяных месторождениях Пермского края [3, 12].

Аномалии с превышением ЛОС в основном расположены в северной части, в лесном массиве в верховьях р. Ясыл. Относительно небольшое количество аномалий данного типа распределено в районе нефтепровода на востоке.

Газогеохимическая аномалия с высоким содержанием УВГ и CH₄ выявлена только на нефтепроводе и может быть связана с отказами оборудования на данном участке.

Распространение аномалий: УВГ; ЛОС; УВГ и ЛОС; УВГ и CH₄; зачастую связывают с местами залегания нефтеносных пластов [2] и миграцией от них газов. Этим можно объяснить расположением аномалий в лесном массиве вдали от нефтепромысловых объектов. Возможны также техногенная миграция и вторичная аккумуляция углеводородов в полостях карстового массива.

Наиболее высокая доля аномалий с высоким содержанием метана расположена в южной части исследуемой территории (рис. 8). Данная аномалия находится неподалеку от Пономаревской пещеры, в которой ранее фиксировались проявления нефтезагрязнения [19]. Метановые аномалии могут быть различного происхождения. Достаточно высокая миграционная способность может свидетельствовать о поступлении метана от газонефтяного месторождения. Также можно предположить аварийное поступление углеводородов, их аккумуляцию в карстовом массиве и постепенное разрушение в процессе микробного метаногенеза.

Большая часть газогеохимических аномалий по содержанию CO₂ расположена в районе нефтепровода. Аномалии данного типа занимают наименьшую площадь. Аномальные концентрации углекислого газа свидетельствуют об аэробных разрушениях органического вещества, что, вероятно, связано с поступлением техногенных углеводородов и их последующей микробной деградацией.

Существуют предположения о техногенном происхождении данных газогеохимических аномалий, которые диагностируют аккумуляцию углеводородов в подземных водах при последующей разгрузке в поверхностные водотоки. Подобные скопления обусловлены повышенным пластовым давлением в разрабатываемых нефтяных залежах и возможностью его передачи в надпродуктивные горизонты или наличием техногенных резервуаров, контролирующих вторичные скопления газов в верхней части геологической среды [10].

Значения мультиспектральных индексов в пределах газогеохимических аномалий и фоновых участков, расположенных в лесных экосистемах, отражены в графиках (рис. 9).

Рост значений вегетационных индексов лесных экосистем относительно фона наблюдается для всех типов газогеохимических аномалий, что согласуется с положительным трендом для всей территории исследования (рис. 3–6).

Считается, что нефтяное загрязнение может оказывать и положительное влияние на вегетацию растений. Такое влияние выявлено для растений экосистем пустынь и полупустынь, находящихся над зонами глубинных разломов нефтеносных территорий [8]. Наибольший положительный прирост значений индексов связан с газогеохимическими аномалиями УВГ. Данная особенность регистрируется по индексам NDVI и GNDVI.

Экология и природопользование

Кучин Л.С.

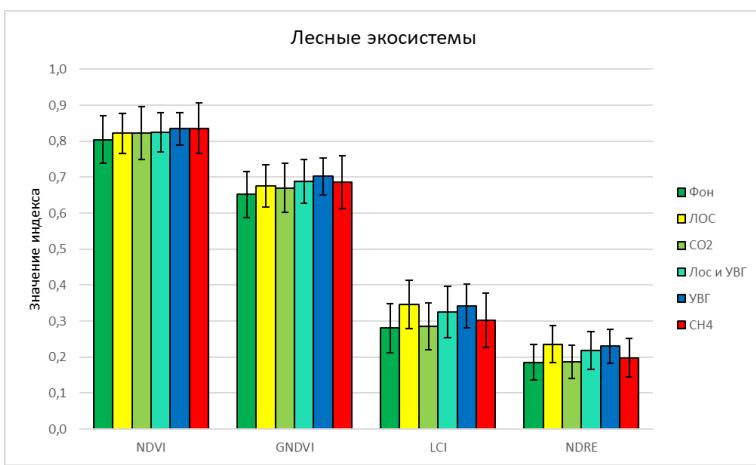


Рис. 9. График значений мультиспектральных индексов лесных экосистем для газогеохимических аномалий и фоновых участков

Fig. 9. Multispectral indices of forest ecosystems for gas-geochemical anomalies and background areas

дить излучению более глубоко в структуру листа [10].

Значения мультиспектральных индексов в пределах газогеохимических аномалий и фоновых участков, расположенных в луговых экосистемах, отражены в графиках (рис. 10).

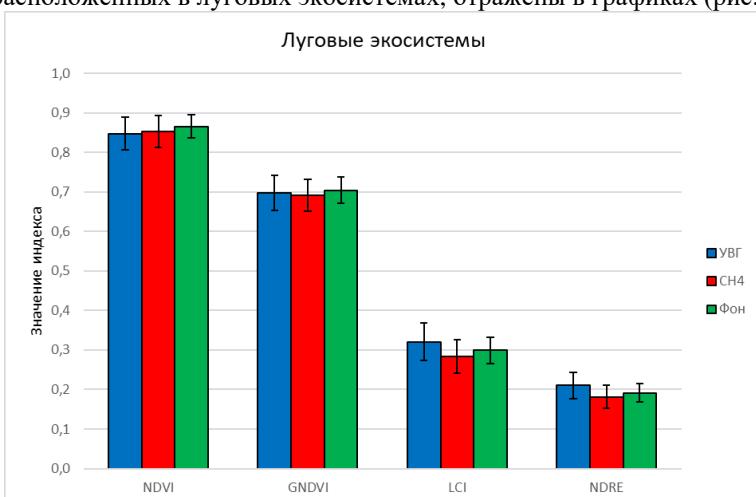


Рис. 10. График значений мультиспектральных индексов луговых экосистем для газогеохимических аномалий и фоновых участков

Fig. 10. Multispectral indices of meadow ecosystems for gas-geochemical anomalies and background areas

Индекс NDVI имеет наименьшую разницу в значениях между фоном и максимальными концентрациями подпочвенных газов. У индекса GNDVI еще более выражен рост значений для газогеохимических аномалий, содержащих УВГ, CH₄, а также одновременно ЛОС и УВГ.

Мультиспектральным индексам LCI и NDRE свойственен рост значений для газогеохимических аномалий по содержанию ЛОС. Однако, в отличие от GNDVI и NDVI, эти индексы фиксируют более контрастный рост значений для газогеохимических аномалий, что может быть связано с применением в синтезе этих индексов Red Edge (красный край). Считается что отличием диапазона «красный край» от излучения в красном диапазоне является более высокая яркость излучения, это позволяет прохо-

дить излучению более глубоко в структуру листа [10]. Значения NDVI и GNDVI фиксируют снижение вегетации на территории аномалий по сравнению с фоновой экосистемой для луговых экосистем, что является отличием от лесных экосистем. Данная особенность может быть связана с более высокой чувствительностью травянистой растительности или особенностями видового состава фоновых участков.

По индексам LCI и NDRE как лесных, так и луговых экосистем выявлен рост вегетационной активности для участков газогеохимических аномалий относительно фоновых участков, что может быть связано с применением в синтезе данных индексов канала Red Edge [10]. Нами предполагается, что индексы, синтезированные с применением данного канала, могут быть более информативны для оценки состояния растительности для выявления газогеохимических аномалий с высокими содержаниями УВГ и ЛОС.

Выходы

Вегетационные индексы реагируют на изменение концентрации газов подгумусового горизонта. Рост значений вегетационных индексов при увеличении концентрации подгумусовых газов считаем преобладающим трендом. Исключением являются концентрации ЛОС, для которых фиксируется тренд снижения значений NDVI и GNDVI. Взаимосвязь вегетационных индексов и концентрации подгумусовых газов сложная и нелинейная, что обусловлено комплексом биогеохимических процессов, протекающих в наземных и подземных биогеоценозах карстового массива.

Всего выявлено шесть типов газогеохимических аномалий. Четыре типа связаны с преобладанием высоких концентраций только одного газа (CH₄, CO₂, ЛОС, УВГ). Два типа аномалий связаны с преобладанием максимальных концентраций двух газов (УВГ и ЛОС или УВГ и CH₄). Наиболее распространены газогеохимические

Экология и природопользование
Кучин Л.С.

аномалии УВГ. Все аномалии, но прежде всего УВГ, диагностируют аккумуляцию нефтепромысловых углеводородов.

Для всех типов газогеохимических аномалий свойственен рост значений вегетационных индексов лесных экосистем. Наибольший рост значений индексов NDVI и GNDVI наблюдается для участков леса в газогеохимических аномалиях с содержанием УВГ от 314,10 до 888,34 ppm. По индексам LCI и NDRE наибольший рост наблюдается для участков леса в газогеохимических аномалиях с содержанием ЛОС от 37,27 до 88,84 ppm.

Наиболее контрастно определяются газогеохимические аномалии с высокими концентрациями УВГ и ЛОС по значениям индексов LCI и NDRE. Поэтому в дальнейшей работе планируется оценить изменение значений диапазона Red Edge и определить перечень мультиспектральных индексов, синтезированных на его основе, с целью выявления наиболее чувствительных к газогеохимическим аномалиям мультиспектральных индексов.

Необходимо провести сравнительный анализ видового состава растительности районов газогеохимических аномалий и фоновой территории, чтобы исключить влияние видового состава на значения мультиспектральных вегетационных индексов.

Перспективным является расширение площади мультиспектральной беспилотной съемки для включения ряда луговых экосистем. Для этого можно использовать материалы газогеохимической съемки, проведенной в бассейне р. Каменки.

Для выделения газогеохимических аномалий перспективно проведение съемки и картирования распределения концентраций углеводородных газов в атмосферном воздухе при помощи газоанализатора, интегрированного на БПЛА.

Библиографический список

1. Андреев Д.Н., Дзюба Е.А., Хотяновская Ю.В. Биотический мониторинг в карстовом районе нефедобычи (Пермский край) // Антропогенная трансформация природной среды. 2017. № 3. С. 87–89. EDN: ZUJVAT
2. Бачурин Б.А., Одинцова Т.А., Борисов А.А. К методике идентификации источников нефтезагрязнения геологической среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 10. С. 291–298. EDN: LDFDRZ
3. Бачурин Б.А., Костарев С.М. Современные геохимические технологии идентификации источников нефтяного загрязнения гидросфера // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2017. № 11. С. 45–50. EDN: ZSIXTV
4. Борисов А.А., Бачурин Б.А. О природе нефтезагрязнения Камского водохранилища в районе Полазненского месторождения // Горное эхо. № 3 (76). С. 17–20. DOI: 10.7242/echo.2019.3.5 EDN: VSKDQY
5. Братков В.В., Кравченко И.В., Туаев Г.А., Атаев З.В., Абдулжалимов А.А. Применение вегетационных индексов для картографирования ландшафтов Большого Кавказа // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2016. № 4. С. 97–111. EDN: XYETCR
6. Бузмаков С.А. Сеть особо охраняемых природных территорий Пермского края // Географический вестник = Geographical bulletin. 2020. № 3 (54). С. 135–148. DOI: 10.17072/2079-7877-2020-3-135-148 EDN: VHFGGD
7. Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Кучин Л.С., Игошева Е.А., Абдулманова И.Ф. Применение беспилотной аэрофотосъемки для диагностики техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 180–193. DOI: 10.31897/PMI.2023.22 EDN: OYQTDS
8. Грищенко О.М. Ботанические аномалии как поисково-разведочный критерий нефтегазоносности // Экология. 1982. № 1. С. 18–22.
9. Гусев А.П. Дистанционные индикаторы деградации лесных геосистем юго-востока Беларуси // Вести Белорусского государственного педагогического университета. Серия 3. Физика. Математика. Информатика. Биология. География. 2020. № 1 (103). С. 46–50. EDN: EBVGTX
10. Каплин В.Г., Чичкова Е.Ф., Грядунов Д.А., Кочин Д.А. Дистанционные методы мониторинга продуктивности посевов озимой тритикале в лесостепи Среднего Поволжья // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. № 2. С. 61–72. EDN: WVRPFF
11. Катаев В.Н., Печенина Е.И. Поверхностные формы карста Ясыльского поля // Гидрогеология и карстоведение: межвуз. сб. науч. тр. Пермь: Перм. ун-т., 2000. Вып. 13. С. 238–246.
12. Костарев С.М. Актуальные аспекты нефтепромысловой гидрогеологии в районах нефедобычи Пермского края // Геоэкология, инженерная геодинамика, геологическая безопасность. Печеркинские чтения: сб. науч. ст. по материалам Международной научно-практической конференции, Пермь, 17 ноября 2020 года / гл. редактор И.С. Копылов. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2021. С. 144–151. EDN: OMLBSY
13. Кудинов В.В., Гольчикова Н.Н. Локализация фонда ликвидированных скважин и типизация территории Астраханского региона по степени экологического риска // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2023. № 2. С. 49–55. DOI: 10.24143/1812-9498-2023-2-49-55 EDN: JUPHRJ
14. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г., Идрисов И.Р. Оценка техногенной нарушенности нефтяных месторождений Среднего Приобья с использованием спутниковых снимков // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 5. С. 53–61. DOI: 10.31857/S0869780920050069 EDN: ADCDNB
15. Приложение DJI Terra для картографии и геодезии. URL: <https://dji-blog.ru/obzory/prilozhenie-dji-terra-dlja-kartografii-i-geodezicheskikh-issledovanij.html?ysclid=m6j9k2hdm735146171> (дата обращения 15.01.2025)
16. Ракутко С.А., Мишанов А.П., Маркова А.Е., Мурзаев Е.А. Биоиндикационная оценка состояния агрокосистемы свекольного поля в органическом севообороте с использованием мультиспектральной съемки // АгроЭкоИнженерия. 2022. № 4 (113). С. 19–36.
17. Тимшанов Р.И., Белоносов А.Ю., Шешуков С.А. Применение геохимической съемки на разных стадиях геологоразведочных работ // Геология нефти и газа. 2018. № 3. С. 103–109 DOI:10.31087/0016-7894-2018-3-103-109 EDN: LYARNJ

Экология и природопользование
Кучин Л.С.

18. Токарева О.С., Пасько О.А., Маджид С.М., Кабраль П. Мониторинг состояния растительного покрова территории центрального Ирака с использованием спутниковых данных Landsat-8 // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2020. № 6. С. 19–31. DOI: 10.18799/24131830/2020/6/2671 EDN: XM0FAL
19. Хотяновская Ю.В. Изменение природной среды в карстовом районе при добыче нефти: диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук: 1.6.21. 2024. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет. 190 с. EDN: OTQUPD
20. Al-Jabri K, Al-Mulla Y, Melgani F, Stefanakis A. Remote Sensing Analysis for Vegetation Assessment of a Large-Scale Constructed Wetland Treating Produced Water Polluted with Oil Hydrocarbons // Remote Sensing. 2023. 15 (24):5632. DOI: 10.3390/rs15245632 EDN: ERWLQE
21. Khotyanovskaya, Y., Buzmakov, S. & Sannikov, P. Identification of oil mining technogenesis based on aerial pho-photography data. J Soils Sediments. 2023. 23. P. 973–988. DOI: 10.1007/s11368-022-03357-y EDN: TAUGVO
22. Naguib N., Daliman Shaparas. Analysis of NDVI and NDRE Indices Using Satellite Images for Crop Identification at Kelantan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. 1102. 012054. DOI: 10.1088/1755-1315/1102/1/012054 EDN: AJGCUO
23. Ta Na, Chang Qingrui, Zhang Youming. Estimation of Apple Tree Leaf Chlorophyll Content Based on Machine Learning Methods // Remote Sensing. 2021. 13. doi: 3902.10.3390/rs13193902.
24. Wanasinghe T.R., Gosine R.G., De Silva O., Mann G.K., James L.A., Warrian P. Unmanned Aerial Systems for the Oil and Gas Industry: Overview, Applications, and Challenges // IEEE Access. 2020 Vol. 8. P. 166980–166997. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3020593 EDN: WCDNPN

References

1. Andreev, D.N., Dzyuba, E.A., Khotyanovskaya, Y.V., (2017). Biotic monitoring in the karst oil production area (Perm Krai). *Anthropogenic Transformation of Nature*. 3. pp. 87–89.
2. Bachurin B.A., Odintsovo T.A., Borisov A.A., (2009). Towards a methodology for identifying sources of oil pollution in the geological environment. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 10. pp. 291–298.
3. Bachurin, B.A., Kostarev, S.M., (2017). Modern geochemical technologies for identifying sources of oil pollution of the hydrosphere. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 11. pp. 45–50.
4. Borisov, A.A., Bachurin, B.A., (2019). On the nature of the oil contamination of the Kama reservoir in the area of the Porozhenskoye field. *Gornoe ekho*. 3(76). pp. 17–20. <https://doi.org/10.7242/echo.2019.3.5>
5. Bratkov, V.V., Kravchenko, I.V., Tuaev, G.A., Ataev, Z.V., Abdulgalimov, A.A., (2016). Application of vegetation indexes for mapping landscapes of the Greater Caucasus *Scientific journal Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*. 4. pp. 97–111.
6. Buzmakov, S.A., (2020). Network of specially protected natural territories of the Perm Territory. *Geographical bulletin*. 3(54). pp. 135–148. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-3-135-148>
7. Buzmakov, S.A., Sannikov, P.Yu., Kuchin, L.S., Igosheva, E.A., Abdulmanova, I.F., (2023). The use of unmanned aerial photography for the diagnosis of anthropogenic transformation of the natural environment during the operation of an oil field. *Notes of the Mining Institute*. Vol. 260. pp. 180–193. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.22>
8. Grishchenko, O.M., (1982). Botanical anomalies as a prospecting and exploration criterion of oil and gas potential. *Ecology*. No. 1. C. 18–22.
9. Gusev, A.P., (2020). Remote indicators of degradation of forest geosystems in the southeast of Belarus. *News of the Belarusian State Pedagogical University. Series 3. Physics. Mathematics. Computer science. Biology. Geography*. 1 (103). pp. 46–50.
10. Kaplin, V.G., Chichkova, E.F., Grydunov, D.A., Kochin, D.A., (2022). Remote methods of monitoring the productivity of winter triticale crops in the forest-steppe of the Middle Volga region. *Bulletin of the Moscow University. Episode 5: Geography*. 2. pp. 61–72.
11. Kataev, V.N., Pechenkina, E.I. (2000). Surface forms of the Yasylyksy field karst. *Hydrogeology and karst science: Interuniversity collection of scientific works*. PSU. Perm. Issue. 13. pp. 238–246.
12. Kostarev, S.M., (2021). Actual aspects of oilfield hydrogeology in the oil production areas of the Perm Region. *Geoecology, engineering geodynamics, geological safety. Pecherkin Readings: A collection of scientific articles based on the materials of the International Scientific and Practical Conference*, Perm, November 17, 2020. Editor-in-chief I.S. Kopylov. Perm: Perm State National Research University. pp. 144–151.
13. Kudinov, V.V., Golchikova, N.N., (2023). Localization of the fund of liquidated wells and typification of the territory of the Astrakhan region according to the degree of environmental risk. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2. pp. 49–55. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-2-49-55>
14. Moskovchenko, D.V., Babushkin, A.G., Idrisov, I.R. (2020). Assessment of technogenic disturbance of oil fields of the Middle Ob region using satellite images. *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*. 5. pp. 53–61. <https://doi.org/10.31857/S0869780920050069>
15. DJI Terra application for cartography and geodesy. URL: <https://dji-blog.ru/obzory/prilozhenie-dji-terra-dlya-kartografii-i-geodezicheskikh-issledovanij.html?ysclid=m6j9k2hdm735146171> (date of request 15.01.2025)
16. Rakutko, S.A., Mishanov, A.P., Markova, A.E., Murzaev, E.A., (2022). Bioindication assessment of the agroecosystem of a beet field in organic crop rotation using multispectral imaging. *Agroecoengineering*. 4 (113). pp. 19–36.
17. Timshyanov, R.I., Belonosov, A.Yu., Sheshukov, S.A., (2018). Application of geochemical surveying at different stages of geological exploration work. *Geology of oil and gas*. 3. pp. 103–109 <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2018-3-103-109>
18. Tokareva, O.S., Pasko, O.A., Majid, S.M., Cabral, P., (2020). Monitoring of vegetation cover in central Iraq using Landsat-8 satellite data. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 6. pp. 19–31. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/6/2671>
19. Khotyanovskaya, Y.V., (2024). Changes in the natural environment in the karst region during oil production: dissertation for the degree of Candidate of Geographical Sciences: 1.6.21. Perm state university. Perm. P. 190.

Экология и природопользование
Кучин Л.С.

20. Al-Jabri, K., Al-Mulla, Y., Melgani, F., Stefanakis, A., (2023). Remote Sensing Analysis for Vegetation Assessment of a Large-Scale Constructed Wetland Treating Produced Water Polluted with Oil Hydrocarbons. *Remote Sensing*. 15(24):5632. <https://doi.org/10.3390/rs15245632>
21. Khotyanovskaya, Y., Buzmakov, S., Sannikov, P., (2023). Identification of oil mining technogenesis based on aerial photography data. *J Soils Sediments*. 23. pp. 973–988. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03357-y>
22. Naguib, N.S., Daliman, S., (2022). Analysis of NDVI and NDRE Indices Using Satellite Images for Crop Identification at Kelantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1102. 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1102/1/012054>
23. Na, T., Qingrui, Ch., Youming, Zh., (2021). Estimation of Apple Tree Leaf Chlorophyll Content Based on Machine Learning Methods. *Remote Sensing*. 13. 3902. <https://doi.org/10.3390/rs13193902>
24. Wanasinghe, T.R., Gosine, R.G., De Silva, O., Mann, G.K., James, L.A., Warrian P., (2020). Unmanned Aerial Systems for the Oil and Gas Industry: Overview, Applications, and Challenges // *IEEE Access*. Vol. 8. P. 166980–166997. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020593>

Статья поступила в редакцию: 31.01.25, одобрена после рецензирования: 04.03.25, принятa к опубликованию: 12.03.25.

The article was submitted: 31 January 2025; approved after review: 04 March 2025; accepted for publication: 12 March 2025.

Информация об авторе

Леонид Сергеевич Кучин

аспирант кафедры биогеоценологии и охраны природы географического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета;
614068, Россия, Пермь, улица Букирева, 15,

Information about the author

Leonid S. Kuchin

Postgraduate Student, Department of Biogeocenology and Nature Conservation, Geography Faculty, Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

e-mail: kleond@bk.ru