

# Некоторые аспекты механизма формирования полезного сигнала в оптическом поле ландшафтов над залежами углеводородов

В. М. Перерва, Е. И. Левчик, А. И. Архипов

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

Одним из путей повышения эффективности нефтегазопоисковых работ является дистанционное изучение оптического поля ландшафтов. Это научное направление разрабатывается в Центре аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины более 10 лет. Сущностью данного направления исследований, составляющего научную основу создания спутниковых технологий прогноза залежей нефти и газа, является изучение закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения с компонентами ландшафтов (растительностью, почвами) с целью оценки их состояния, позволяющее оперативно получать важную информацию о продуктивности нефтегазопоисковых объектов.

Важным элементом комплекса факторов, обуславливающих формирование полезного сигнала, связанного с влиянием залежей УВ, являются пути их вертикальной миграции от залежи к корнеобитаемому слою растений. По нашим представлениям [24, 25, 27, 28] модель структур литосферы, по которым развиваются процессы миграции УВ и получившими в наших работах название геофлюидодинамических структур литосферы (ГФДС), представляется следующим образом.

Имеющиеся к настоящему времени данные, полученные преимущественно по материалам аэрокосмических съемок, позволяют сформулировать следующую модель их формирования и строения. Формирование ГФДС, как своеобразных структур литосферы, связано с узлами пересечения вертикальных зон напряженно-деформированного состояния литосферы (ВЗНДС). Хотя природа этих образований во многом остается непознанной, тем не менее их сущность в общем виде вырисовывается достаточно однозначно. Проекцией на земную поверхность (следом на земной поверхности) ВЗНДС являются прямолинейные зоны, дешифрируемые на аэрокосмических снимках как линеаменты. Наиболее важные свойства ВЗНДС отчетливо прослеживаются по характерным признакам линеаментов.

В плане ГФДС имеют, как правило, изометрические очертания и по этой причине их нередко относят к большой полигенетической группе кольцевых образований.

Размеры ГФДС зависят от ширины формирующих их ВЗНДС и варьируют от 1 до 200 км (возможно и более). Структура ГФДС имеет ярко выраженный гетерогенный характер, выражющийся в чередовании участков низкой и высокой проницаемости. Последние, как элементарные образования ГФДС, названы нами очагами разуплотнения. Их размеры составляют в поперечнике 300—400 м. При этом не исключается, что размеры очагов могут быть и меньшими.

ГФДС выражены практически во всех компонентах ландшафтов: рельфе, гидросети, почвах, растительности. Пожалуй, наиболее универсальным признаком выражения ГФДС являются спектральные характеристики растительности, приобретающие в зоне ГФДС аномальный характер.

Ландшафт над залежью углеводородов (УВ) характеризуется локальным изменением физико-химических параметров его элементов. В настоящее время считаются доказанными аномальные изменения геофизических, геохимических и биохимических процессов в пределах нефтегазоносных структур. В этих структурах имеют место чередование зон повышенных и пониженных механических напряжений, которые обусловливают возникновение разных видов энергии, интенсивный перенос потоков тепла, жидких и газообразных флюидов. В зонах аномально низких значений механических напряжений, которые соответствуют участкам аномальных фильтрационных свойств горных пород, развиваются окислительно-восстановительные процессы. Вследствие этого в данных зонах формируются зонально-кольцевые аномалии полей: геофизических (электромагнитных, гравитационных, тепловых, радиационных, упруго-деформационных, сейсмоакустических и др.), геохимических

(элементных, солевых, газовых и др.), биохимических (бактериальных, микрофлористических) [11].

Вследствие неоднородности осадочных пород, влияния нарушений, особенностей поверхностных отложений форма газовых аномалий и концентраций УВ, как показали многочисленные исследования, бывают «прямыми», когда максимум газообразования наблюдается над газовым или нефтяным месторождением (таких довольно мало), и кольцевыми, у которых максимальные значения газообразования приурочены к крыльям структур, а минимальные наблюдаются над их сводами. Наличие диффузионно-фильтрационного потока УВ от залежи способствует возникновению специфических геохимических условий в почвенно-грунтовой зоне месторождения и вызывает изменения микробиологического режима в этих слоях, которые, в свою очередь, влияют на бактериальную и грибную составляющие микробного сообщества, формируя специфические условия для роста растений [10, 20, 30].

Для обнаружения спектральных аномалий, связанных с воздействием указанных процессов, нужны специальные виды съемок и обработки их материалов, например многозональная съемка и синтезирование зональных аэрокосмических изображений.

Исходной посылкой при разработке методов дистанционной фитоиндикации является положение о наличии корреляций между влиянием определенных факторов внешней среды и откликом на них растений [3, 5, 7, 8, 14, 15, 17, 21]. Это положение основано на всеобщем принципе единства живых организмов и окружающей среды. Растительный покров (РП) является одним из важнейших компонентов ландшафта и играет ключевую роль в функционировании экосистем. Он определяет кислородный и энергетический баланс планеты, характер почвообразовательных процессов, является носителем генетической информации, обеспечивая существование и эволюцию жизни на Земле. Широкое освоение дистанционных методов изучения РП послужило новым стимулом развития моделей их радиационного режима (МРР). Разработка проводится с целью расчета спектральных отражательных характеристик РП как функций оптико-биологических параметров РП [5, 13, 15, 18, 10, 22].

С точки зрения оптики растение представляет собой полупрозрачное тело, которое частично поглощает солнечное излучение, частично отражает его и частично пропускает (рис. 1). Взаимосвязь этих процессов представлена уравнением энергетического баланса

$$I_\lambda = R_\lambda + A_\lambda + T_\lambda, \quad (1)$$

где  $I_\lambda$  — падающая энергия,  $R_\lambda$  — отраженная энергия,  $A_\lambda$  — поглощенная энергия,  $T_\lambda$  — пропу-

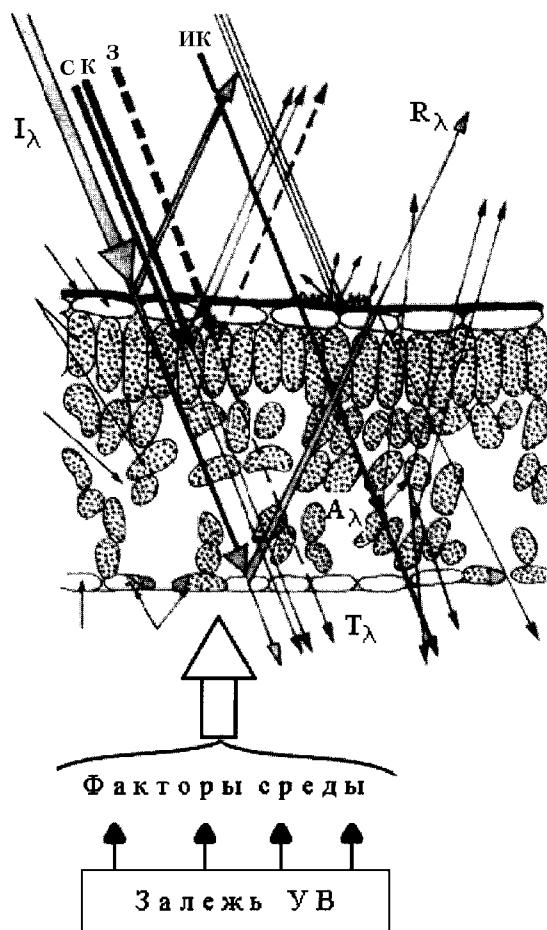


Рис. 1. Модель радиационного режима зеленого листа над залежью УВ. Условные обозначения: С — синяя зона спектра, З — зеленая зона спектра, К — красная зона спектра, ИК — инфракрасная зона спектра

скаемая энергия [7, 13, 15].

Воздействие различных факторов среды, в том числе и обусловленных залежью УВ, сопровождаются в РП перераспределением между составляющими МРР. При аэрокосмической съемке регистрируется только отраженный поток электромагнитного излучения  $R_\lambda$ . Поэтому при наличии

$$\Delta R_\lambda = R_{\lambda\phi} - R_{\lambda_o} \neq 0 \quad (2)$$

(где  $R_{\lambda\phi}$  — значения радиационных потоков, отраженных РП над фоновым участком,  $R_{\lambda_o}$  — над объектом) можно выявить воздействие интересующих исследователя факторов окружающей среды на РП.

Основным органом (чувствительным элементом), воспринимающим солнечную радиацию, является лист, и от его оптических свойств в значительной

степени зависит энергообеспеченность растения и функционирование РП. Закономерности спектрального отклика листа в принципе справедливы и для растительных объектов более высокого уровня организации: растения в целом, растительных сообществ, РП. Спектральная область поглощения радиации листом включает УФ-, видимые и ИК-лучи. УФ-лучи (240—400 нм) практически полностью поглощаются клеточными оболочками, ферментами и различными пигментами. ИК-лучи поглощаются водой, содержащейся в тканях листа, и цитоплазмой. В видимом диапазоне спектр поглощения листа характеризуется двумя максимумами, в оранжево-красной (660—680 нм) и сине-фиолетовой (460—490 нм) зонах, и обусловлен наличием и функционированием растительных пигментов. Необходимо отметить, что пигменты играют исключительную роль в жизни растений. Так, благодаря особым фотосинтетическим пигментам в процессе фотосинтеза происходит преобразование энергии света в энергию макроэргических химических связей в масштабе Земли, что делает растения одним из важнейших звеньев пищевой цепи. Существование растений, их выживание в различных условиях среды определяется функционированием пигментов, выполняющих фотозащитную, морфолого-приспособительную, регуляторную функции. Практически все пигменты вносят свой вклад в формирование кривой поглощения в видимом диапазоне, хотя определяющими являются хлорофиллы [5, 17, 32—37].

Как установлено многочисленными исследованиями с использованием более 1400 видов растений из разных таксономических групп в различных экологических условиях и на разных географических широтах, положения красного и синего максимумов поглощения весьма стабильны [32]. Это позволяет рассматривать лист как универсальное устройство для поглощения солнечной радиации. Количество поглощаемой радиации в значительной степени определяется содержанием и составом пигментов, особенностями поверхности листа и его внутренней структуры, содержанием воды. Часть поглощенной радиации может переизлучаться в виде тепла или флуоресценции, а непоглощенная часть отражается от поверхности и внутренних структур фитоэлементов. Отраженная радиация может быть зарегистрирована дистанционно. Большинство приборов дистанционного зондирования работает в диапазоне длин волн от 300 до 3000 нм. В соответствии с существующими представлениями можно выделить два типа рассеяния света листьями: частично зеркальное рассеяние на поверхности верхнего слоя кутикулы и многократное внутреннее отражение на оптически неоднородных структурах листа, которое имеет диффузный характер

[32—34, 36]. Первой границей раздела фаз на поверхности листа, с которым взаимодействует падающее излучение, является многослойная кутикула. Эпикутикулярный воск (поверхностный слой) имеет кристаллоподобную структуру и обуславливает частично зеркальный характер отражения. Сложная неортропная поверхность многих листьев (микрорельеф поверхности, наличие и характер опушения) также способствует многоразовому отражению в поверхностном слое. На характер рассеяния света могут оказывать влияние первичная и вторичная клеточные стенки, имеющие в своем составе упорядоченно упакованные целлюлозные микрофибриллы, которые придают стенкам кристаллические свойства, срединная пластинка и т. д. Основной поток излучения формируется в клетках губчатого мезофилла в силу наличия значительного количества межфазных переходов клеточная стена — воздух. Спектральную отражательную характеристику растительного объекта (отдельного листа, зеленого растения, РП) можно представить в виде типичной кривой (рис. 2).

Как видно, отражательная способность растительного объекта в видимом диапазоне минимальна вследствие высокого поглощения света данных длин волн различными пигментами. Минимумы на кривой отражения совпадают с двумя основными полосами поглощения хлорофилла. Между этими полосами наблюдается довольно высокое отражение в зеленой зоне (530—540 нм), что обуславливает привычную зеленую окраску вегетирующих растений. Существенное влияние на форму кривой отражения зеленых листьев оказывают антоцианы. Даже небольшое их количество вызывает снижение отражения в зеленой зоне спектра и приводит к смещению максимума отражения в более длинноволновую сторону (630 нм), что визуально фиксируется как покраснение. Наибольшее количество антоцианов регистрируется в молодых и новообразованных листьях и побегах. Наличие каротиноидов в зеленом растении, обычно замаскированное хлорофиллом, становится заметным, например при старении, когда основная масса хлорофилла разрушается (осеннее расцвечивание листьев).

В ближнем инфракрасном диапазоне (БИК) отражательная способность листы заметно возрастает, начиная приблизительно с 700 нм. Для большинства видов растений коэффициент отражения в БИК-диапазоне составляет приблизительно 45—50 %, коэффициент пропускания — 45—50 %, коэффициент поглощения — менее 5 %. Установлено, что на отражательную способность в БИК-диапазоне влияет сложная внутренняя структура фитоэлементов. Известно, что лист как оптическая система отличается чрезвычайно сложной внутренней структурой и на уровне тканей (различные

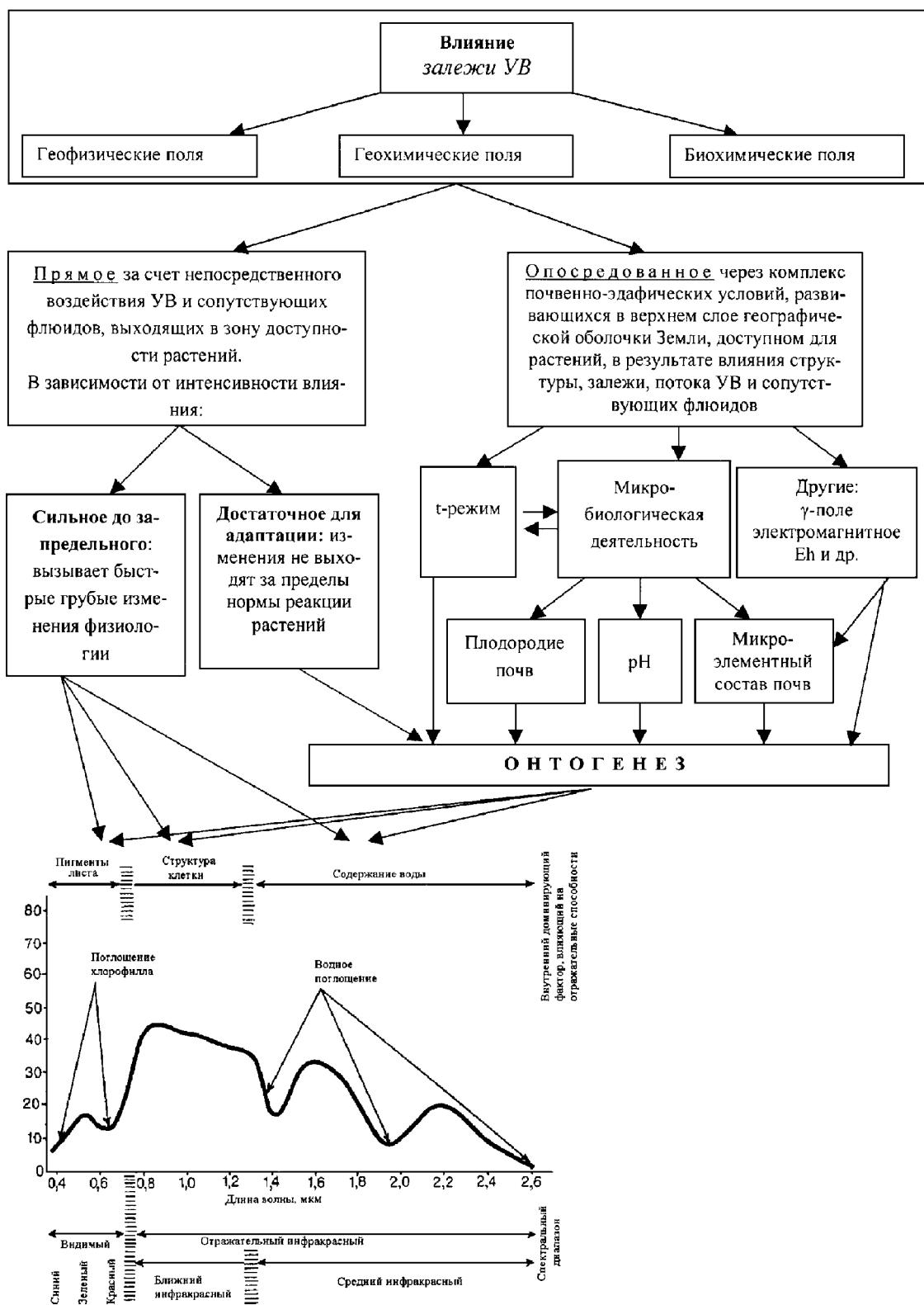


Рис. 2. Схема влияния залежи УВ на основные характеристики спектрального отклика растительности (модифицированная схема [7])

слои клеток, проводящая система), и на уровне клетки (хлоропласти, способные к перемещениям и поворотам, сложная динамичная система мембранных структур), и на уровне хлоропласта (система ламелл и гран, количество и распределение молекул пигмента в гранах). Разнообразие структурных элементов и обилие межфазных границ обуславливает большое внутреннее рассеяние и отражение света. Поэтому даже самый тонкий лист поглощает света значительно больше, чем слой раствора пигментов соответствующей концентрации [33–34]. Вместе с тем сложность внутренней структуры листа предоставляет большие возможности для ее перестройки на разных уровнях — тканевом, клеточном, внутриклеточном, в зависимости от условий освещенности, а также под влиянием иных экологических факторов. Различия анатомо-морфологической структуры листьев разных видов здоровых растений, а также листьев особей одного вида растений, произрастающих в отличающихся условиях, сопровождаются достаточно четкими различиями кривых отражения в БИК-диапазоне.

Высокое пропускание листом электромагнитного излучения в БИК-диапазоне в натурных условиях приводит к тому, что отражение в этом диапазоне от растения и РП в целом может достигать 85 % [7, 13]. Это явление обусловлено аддитивной отражательной способностью: энергия, пропущенная через верхний слой листьев и отраженная от второго слоя, частично передается обратно через первый слой. При наличии многолистовой листовой поверхности данный процесс повторяется многократно, сопровождаясь усилением отражения, пропорциональным количеству слоев (ярусов в пределах кроны) листьев [7, 13, 14]. На отражательную способность листа в БИК-диапазоне (от 760 до 1300 нм) наряду с внутренней структурой оказывают влияние и полосы поглощения воды.

Отражение листа в среднем ИК-диапазоне (1300—2600 нм) практически полностью находится под влиянием полос поглощения воды. Установлена обратная зависимость отражательной способности листа в этом диапазоне и общим содержанием воды.

Рассмотренные выше закономерности распределения отраженного потока солнечной энергии в спектре растения проявляются как в отдельно взятом листе, так и в листе различных видов растений и в спектральных характеристиках РП в целом [7, 9, 14]. Растительные ценозы могут включать в себя элементы, каждый из которых сам по себе обладает низкой чувствительностью по отношению к отдельным факторам. Благодаря кумулятивному эффекту за длительное время происходят изменения состояния систем высшего порядка, что позволяет использовать дистанционные методы для про-

странственно-временной фитоиндикации природных и антропогенных аномалий [21].

Растительный покров, согласно классификации спектральных отражательных свойств природных образов [13], относится к классу II, характеризующемуся максимумом на 550 нм, минимумом в пределах главной полосы поглощения хлорофилла (660—680 нм), за которым следует резкий подъем в сторону длинных волн. Класс неоднороден. В зависимости интенсивности отражения при 550 нм и 800 нм растительных сообществ разделяется на типы: *тип 1* — хвойные породы лесных насаждений (наиболее низкие отражательные характеристики); *тип 2* — РП с недостаточно сочной растительностью (суходольные луга, хвойные породы летом и др.); *тип 3* — сочные травяные покровы, лиственные насаждения в период активной вегетации; *тип 4* — лесные насаждения в период осенней раскраски и созревшие сельскохозяйственные культуры.

Детальный анализ кривых отражения лесных массивов и отдельных листьев [1], показал, что лесные насаждения характеризуются кривыми отражения с менее четко выраженным максимумом в желто-зеленой зоне и более размытым минимумом в области красных и синих лучей. Интегральная интенсивность отражения (КСЯ) лесных массивов в диапазоне 400—700 нм в 1.5—3 раза ниже, чем КСЯ отдельного листа. В БИК-диапазоне (760—1100 нм) значения КСЯ отдельных листьев и крон практически совпадают.

В радиационный режим леса существенный вклад вносит лесная подстилка, отражательные свойства которой определяются соотношением проективного покрытия вегетирующей растительности, оголенной почвы и опада, их яркостью и цветом [7, 14, 15]. Характер спектральной кривой изменяется в зависимости от случайной ориентации листьев и многократного перепоглощения ими и переотражения от них ИК-излучения в пределах кроны. Согласно математической модели прохождения потока солнечной радиации через сплошной РП спектральное отражение можно рассматривать как функцию суммарной поверхности фитоэлементов, коэффициентов поглощения, рассеяния и отражательной способности субстрата [7, 14]. Коэффициенты эти находятся в зависимости от оптических свойств фитоэлементов РП, от высоты РП, густоты, характера теневых и световых участков. С увеличением густоты РП уменьшается КСЯ в диапазоне 600—700 нм вследствие высокого поглощения массой хлорофилла, тогда как в диапазоне 700—800 нм отражение возрастает вследствие значительного рассеяния листьями. Важными являются условия освещения (высота солнца, условия облачности), и визирования, а также свойства атмосферы как сре-

ды, через которую проводятся наблюдения [7, 13—15, 19].

Таким образом, спектральная кривая отражения в видимом и ИК-диапазонах несет в себе прямую и опосредованную информацию о состоянии листа и РП в целом, о качественных и количественных особенностях пигментного состава и функционировании фотосинтетического аппарата, структуре листа и других фитоэлементов, особенностях поверхности, степени оводненности. Логично предположить, что любое воздействие на растительный организм, затрагивающее прямо или косвенно функционирование его систем жизнеобеспечения, найдет свое выражение в изменениях спектров отражения.

Факторы, действующие на растительный организм, принято разделять на внутренние и внешние.

К основным внешним факторам относятся факторы окружающей среды (свет, температура, условия влагообеспеченности) и условия минерального питания, т. е. те факторы, которые определяют существование и характер РП, и к которым растения данной территории филогенетически адаптированы. Так, спектральный состав света определяет количество антоцианов [3, 32]. Интенсивность света определяет содержание антенного хлорофилла (обратная зависимость) и накопление каротиноидов (прямая зависимость), что ярко проявляется у световых и теневых, а также высокогорных растений [32]. Свет через систему фитохром — гормоны непосредственно влияет на скорость и направленность ростовых процессов на формирование анатомо-морфологической структуры листа и растения в целом. Температурный фактор ограничивает жизнедеятельность растительных организмов во времени, влияя на активность ферментов и регулируя интенсивность обменных процессов, в том числе накопление пигментов. Влияние температуры отчетливо проявляется в ИК-диапазоне: яркость возрастает в дневное время и в безоблачную погоду; в засушливую пору яркость РП выше, чем в сырую [3, 7, 19, 22]. Вода является основной средой протекания биохимических процессов, поэтому колебания водного баланса у большинства растений без утраты жизнеспособности может происходить лишь в определенных пределах. Условия минерального питания заметно влияют на состояние растений [16, 18, 21, 35], особенно сельскохозяйственных, выращиваемых в монокультуре [5, 17]. В естественных условиях растения приспособлены к режиму питания, так как материнские породы и почвы в определенных климатических условиях являются геохимической основой формирования растительных сообществ. В этом ключе наибольший интерес представляет исследование оптических характеристик растений в целях поиска рудных и нерудных полез-

ных ископаемых [2, 9, 14, 18, 20, 21, 29, 35, 37]. Для многих растений с рудных месторождений характерно повышение отражательной способности в видимой области и снижение ее в ИК-диапазоне [9]. Необходимо отметить, что факторы внешней среды в природе не действуют изолированно, а исключительно в комплексе друг с другом и внутренней средой растения. Определяющим является фактор, значения которого более всего отклоняются от его оптимальных для данного вида значений.

Основным внутренним фактором является процесс индивидуального развития (онтогенез), на каждом этапе которого предъявляются свои требования к количественному и качественному составу пигментов, интенсивности и направленности процессов обмена веществ, формированию и функционированию особых органов. Например, у злаковых растений максимальное количество хлорофиллов содержится в средних листьях в период, предшествующий цветению [32], тогда как у бересклета оно регистрируется после стабилизации роста листа [15].

Процесс онтогенеза сопровождается значительными изменениями структуры листьев, архитекторники растения, его размеров. Пластичность структуры листьев проявляет себя не только в разных условиях произрастания, но и в пределах одной особи. Например, у деревьев, растущих на опушке леса, листья, расположенные на стороне леса, имеют более мезоморфный характер по сравнению с более ксероморфными листьями открытой стороны дерева. Листья разных ярусов одних и тех же растений находятся в неодинаковых условиях водоснабжения, поскольку подъем воды связан с преодолением сопротивления (сил тяжести, трения), возрастающее с повышением высоты, на которую необходимо поднять воду. Кроме того, у растений, особенно у деревьев, верхние листья обычно находятся в особых микроклиматических условиях: усиленное освещение, нагревание, ветер, высушивание. Поэтому, как правило, верхние листья растений характеризуются более ксероморфной структурой, чем средние и нижние листья. Это справедливо для всех растений, как травянистых, так и особенно деревьев, и известно как закон Заленского [12]. Изменение структуры листа — это выражение совокупности всех изменений, которые сопровождают онтогенез растений и обусловлены метаболическими процессами, темпами и характером органообразовательной деятельности верхушечной меристемы и коррелятивными связями побега и корней [4]. Пластичность структуры листа — это в первую очередь проявление онтогенетических изменений организма, которое имеет место и во всех других органах растений, но в строении листа проявляется наиболее ярко. Наиболее контрастно

это явление выражено у представителей класса двудольных (к нему относятся все произрастающие в наших широтах древесные цветковые растения). Учет онтогенетических особенностей при исследовании оптических характеристик листа представляется очень важным, поскольку отдельные этапы онтогенеза могут быть критическими по отношению к действию внешних факторов, вследствие чего в разные периоды жизни реакция растений на один и тот же фактор будет иной. В то же время любое внешнее воздействие тем или иным образом влияет на скорость прохождения растением этапов онтогенеза, замедляя или ускоряя его, и так или иначе отразится на структуре листа, и следовательно, на его оптических характеристиках [4, 21].

Спектральная отражательная кривая является результатирующей такого взаимодействия. В обобщенном виде возрастные изменения спектрального отклика таковы: интегральная отражательная способность выше у молодых растений и ниже у находящихся в стадии полной зрелости. В конце периода вегетации наблюдается повышение отражения в видимом диапазоне, связанное с разрушением пигментов, и снижение отражения в ИК-диапазоне, очевидно, обусловленное с накоплением сухого вещества, деструктуризацией тканей и снижением их оводненности. Оптические свойства растений зависят от географического положения и экологических условий. В условиях, приближающихся к оптимальным, растения характеризуются меньшими коэффициентами отражения и более четким максимумом в зеленой зоне спектра по сравнению с растениями, находящимися в худших условиях. Сходное со старением снижение отражения в БИК-диапазоне наблюдается при заболеваниях [4, 7–9, 22].

Жизнь и отражательные свойства РП средних широт характеризуется четко выраженной сезонностью. Сезонные изменения РП могут существенно повлиять на результаты его дистанционных исследований, поскольку на разных стадиях вегетации зависимость отражательных откликов РП в отдельных диапазонах от биометрических параметров (биомассы, индекса листовой поверхности и т. д.) изменяются. Так, спектр отражения вегетирующего растения и РП в целом заметно отличается от его отклика в период цветения, когда в картину отражения вносят существенный вклад пигменты, обуславливающие окраску цветков (антоцианы, флавоноиды и др.). В связи с этим резко снижается взаимосвязь между индексами листовой поверхности и надземной биомассы, в результате чего точность оценки надземной фитомассы по данным дистанционного зондирования в видимом и БИК-диапазонах на поздних этапах вегетации уменьшается [21, 33, 34]. Контрасты в сезонном расцвечи-

вании листвы используются для решения задач распознавания отдельных типов РП [3, 13, 15, 19]. Оптимальными сроками проведения дистанционных исследований с целью распознавания типов РП по их отражательным откликам считаются такие, когда различия типов РП максимальны: например, для хвойных и лиственных лесов это — начало и конец вегетации. Этот же подход можно использовать и для выявления участков РП, находящихся под влиянием залежи УВ. Поскольку действие факторов среды на живой организм проявляется в изменении скорости прохождения отдельных этапов онтогенеза, то есть ускоряет или замедляет переход в следующую фазу, следует предположить, что в условиях экологического пресса дистанционно регистрируется на фоне однородного РП более «молодые» (развитие замедлено) или «старые» (развитие ускорено) аномальные участки. Для своевременного выявления таких аномальных участков желательно проведение на интересуемой площади мониторинговых работ с последующим созданием банка оптических характеристик изучаемых РП в связи с периодом вегетации и состоянием РП. Эффективность распознавания состояния РП можно повысить при использовании так называемых вегетационных индексов — комбинаций отдельных спектральных параметров, что позволяет снижать уровень шумов, выявлять и усиливать контраст между отдельными оптическими диапазонами [5]. Повышение эффективности интерпретации данных дистанционного зондирования возможно при применении адекватных методов математической обработки, позволяющих работать при низких значениях информационного сигнала.

Изучение спектральных свойств растительных сообществ составляет основу разработки дистанционных методов оценки состояния РП для решения различных прикладных задач, в том числе поиска залежей УВ [2, 20, 29]. Оптические характеристики растительных сообществ целесообразно свести к определению одного параметра — спектральной отражательной способности, которая количественно выражается через альбедо и коэффициент спектральной яркости [15]. В зависимости от действия факторов среды наибольшие различия кривых отражения наблюдаются в диапазонах 550–660 нм, 660–680 нм и 800–890 нм. Дополнительная информация о состоянии РП (о типе листьев и содержании в них влаги), а также о влажности почвы может быть получена в диапазоне 1650 нм [5, 13, 15].

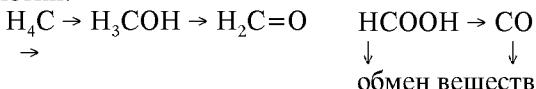
Растения, произрастающие в районах промышленных скоплений УВ, могут подвергаться их систематическому воздействию. Физиологобиохимические механизмы воздействия алифатических и ароматических УВ на растения до настоящего вре-

мени в полной мере не выяснены, хотя интерес к этой проблеме проявляется наукой уже в течение столетия. Тем не менее анализ существующей по этому вопросу литературы [10, 20, 23, 31] позволяет сделать некоторые выводы относительно действия экзогенных по отношению к растениям УВ.

Углеводороды являются характерными стабильными составляющими биосфера и как одна из важных форм существования углерода занимают важное место в обмене веществом и энергией между внутренними геосферами и биосферой, между природной средой и обществом [23]. В. И. Вернадский называл газовую углеводородную составляющую одной из важнейших. Биосферные (биолитогенные, как результат биогенного синтеза из продуктов распада биомассы) и литосферные (эндолитогенные — результат природной дегазации оболочек Земли — литосферы и мантии) потоки УВ на протяжении всей истории биосфера участвовали в геохимическом цикле углерода, поддерживающем жизнь на Земле. Главным фактором образования скоплений УВ в литосфере являются эндолитогенные потоки УВ.

Алифатические предельные УВ широко распространены в растениях [23, 31]. Особенно богаты алканами листья. Алканы листьев локализованы в основном в кутикуле, однако обнаружены они и в составе липидов хлоропластов. Основным местом синтеза алканов является эпидермис. Процесс биосинтеза инициируется светом. В растениях предшественниками алканов являются соответственные жирные кислоты, а разветвленные алканы могут синтезироваться из аминокислот. Ароматические УВ синтезируются из непредельных УВ (этилена, ацетилена).

Эксперименты с применением меченых по углероду УВ показали, что способность к поглощению и усвоению УВ из окружающей среды является общим свойством высших растений. Процесс утилизации УВ у растений можно разделить на две стадии. Первая стадия охватывает первичные процессы окисления УВ вплоть до образования характерных метаболитов клетки. Следовательно, эта стадия предусматривает *частный* метаболизм молекулы экзогенного УВ и представляет собой *детоксикационный акт* растительного организма в отношении чужеродного вещества. Вторая стадия процесса — это включение С-скелета молекулы экзогенного УВ в *общий* метаболизм растительной клетки.



Такой ход окисления характерен для метана и других алканов. В окислении УВ активно участвуют пластиды: 30—40 % меченого углерода обнару-

живается в хлоропластной фракции, около 50 % — в цитоплазматической фракции. В процессе такого окисления у растений, в отличие от микроорганизмов, для которых УВ являются источником энергии, необходимая энергия поступает из клеточных резервов, что при избытке экзогенных УВ может вызвать их истощение.

Как установлено в экспериментах *in vitro* первичные продукты окисления алканов и аренов (альдегиды и хиноны) в процессе метаболизма взаимодействуют с молекулами белков и необратимо связываются с ними. Это обстоятельство свидетельствует о возможности негативного влияния на растения, о том, что при определенных обстоятельствах УВ могут выступать в роли стрессового фактора. Ароматические УВ характеризуются значительно более высокой физиологической активностью, чем соответствующие алканы и циклоалканы. Например, бензол *in vivo* ингибирует ферментные системы растений.

Анализ литературных источников по данному вопросу свидетельствует о том, что усвоение УВ, т. е. их поглощение и утилизация, у растений находится в зависимости от сочетания ряда внешних (концентрация УВ, доступность для растения, зависящая от типа почв, температуры, освещенности, влажности и т. д.) и внутренних (состояние растения: фаза развития, состояние здоровья, обусловленное наличием или отсутствием инфекций, иного поражения, степень врожденной способности к усвоению УВ) факторов. Как правило, «буферная емкость» растительной клетки достаточно высока, поэтому растения в природных условиях обычно достаточно хорошо переносят УВ.

В зависимости от интенсивности процессов энергомасопереноса от залежи УВ можно видеть два основных типа реализации проявления влияния залежей УВ на «живое вещество». Первый из них связан с природными выходами УВ на поверхность Земли. В таких условиях УВ представляют собой доминирующий фактор влияния залежей УВ. Газоподобные УВ могут замещать кислород почвенного воздуха, непосредственно формируя тем самым неблагоприятные условия для дыхания корневой системы высших растений (хвойных, цветковых), в результате чего нарушается поглощение воды и минеральных веществ. Все это приводит к угнетению жизнедеятельности растений вплоть до их гибели. Жидкие УВ в значительных концентрациях фактически изолируют корневую систему от окружающей ее почвы, также в конечном итоге вызывая угнетение и гибель растений. Сопутствующие газоподобные и пароподобные элементы флюидного потока, например, Hg, H<sub>2</sub>S и другие, в незначительных дозах также могут непосредственно отравляющие действовать на ферментные системы расте-

ний. Кроме того, в таких условиях должна страдать не только корневая система растений, но и их надземная часть, поскольку в приземном атмосферном слое концентрации данных веществ также будут значительно повышены. Важно отметить, что отдельные виды растений различаются между собой по степени чувствительности к влиянию данного фактора. Так, клен канадский проявляет повышенную устойчивость к просачиванию метана по сравнению с дубом, что приводит до постепенного замещения со временем дубов кленами в зонах природных выходов УВ на некоторых территориях Канады [20]. У растений, которые произрастают в условиях избытка УВ в почвах, когда детоксикационные процессы не компенсируются физиологическими возможностями организма, то есть в стрессовой ситуации, происходят изменения как на уровне фенотипа, так и на генетическом уровне. На фенотипическом уровне отмечены угнетение роста, подвядание, изменения окраски листьев, ориентации в пространстве побегов и листьев. Такие изменения зарегистрированы, к примеру, у шалфея, произрастающего в местах непосредственного выхода УВ [20]. У канареекника тростниковидного на генетическом уровне выявлены изменения структуры популяционной изменчивости признака «длина простокта» под влиянием жидких УВ в среде выращивания [6, 30].

Второй тип проявления влияния залежей УВ на макро- и микробиоту можно охарактеризовать как опосредованный. Граница между двумя типами достаточно условна и определяется главным образом значениями концентрации мигрирующих флюидов, преимущественно УВ. Поэтому влияние на биоту залежи УВ в данном случае является результатом сложного взаимодействия всех перечисленных выше полей. В свою очередь, интенсивность процессов энергомассопереноса от залежей УВ зависит от ландшафтных процессов литолого-геохимических условий верхнего слоя осадочного чехла [10, 29]. В условиях разуплотнения пород, где преобладают фильтрационные процессы массопереноса флюидов (и где важную роль играют УВ), бактериальный фильтр обуславливает накопление в почвах металлогорганических соединений, содержащих гидроксильные и аминогруппы. Преобладание интенсивности потока УВ над поглощающей способностью УВ — окисляющей микрофлоры приводит к появлению качественно новых физико-химических условий (восстановительные условия), за счет чего поливалентные металлы (Со, Сг, V, Fe и др.) становятся более подвижными и более доступными для поглощения растениями. Бактериальный фильтр в условиях, где преобладает диффузационный массоперенос флюидов, приводит к повышению щелочности почвенных растворов, накоплению вто-

рических карбонатов, перераспределению породообразующих оксидов. Так формируются специфические условия минерального питания.

Особое место в комплексе влияния указанных выше полей принадлежит температурному фактору — температурным аномалиям, которые регистрируются над залежами УВ и флюидопроводящими зонами новейшей тектонической активности и разуплотнения горных пород [18]. Зарегистрированные значения колебаний температуры (в условиях ДДВ диапазон колебаний находится в пределах  $-2.6^{\circ}\text{C}$ — $+4.5^{\circ}\text{C}$ ), позволяют считать данный фактор одним из важнейших факторов влияния залежи УВ на процессы роста высших растений и микрофлоры, поскольку от него прямо и косвенно зависит скорость физических (растворение, адсорбция газов, паров и др.), химических (окисления и восстановления УВ и иных химических соединений) и биохимических обменных процессов: фотосинтеза, дыхания, транспорта воды, питательных веществ и продуктов обмена.

Воздействие на растительность аномальных процессов и полей в пределах зон интенсивной вертикальной миграции пластовых и глубинных флюидов визуально зарегистрированы в районе Новотроицкого нефтегазоконденсатного месторождения [26]. Аномальное состояние сосен выражается в интенсивном проявлении процессов деформирования стволов деревьев, характере их ветвления, отмечен значительный процент погибших деревьев.

Необходимо подчеркнуть, что признаки подвядания, изменение окраски листьев и побегов, изменение ориентации фитоэлементов в пространстве, то есть внешние признаки проявления прямого стрессового влияния залежей УВ и сопутствующих флюидов на процессы жизнедеятельности растений могут быть зарегистрированы наземными и аэрокосмическими методами в видимом и инфракрасном диапазонах спектра электромагнитного излучения. В случае влияния залежей УВ второго типа (опосредованного) растения, произрастающие на данной территории, приспособлены к данным условиям. Анатомо-морфологические и физиолого-биохимические различия между растениями с фоновых участков и растущих в пределах залежи УВ могут быть менее значительными в сравнении с реакцией на непосредственное действие УВ. В то же время при наличии современных технологий существует реальная возможность регистрации и анализа этих различий физиологического состояния растений оптическими методами [2, 26, 29].

Таким образом, полученные дистанционными методами характеристики отражения РП в видимом и ИК-диапазонах электромагнитного излучения несут в себе комплексную информацию о состоянии РП: о качестве и количестве пигментов,

структуре листвы, геометрии и плотности составляющих РП, условиях жизни. Наиболее информативными для получения сведений о состоянии РП являются диапазоны спектра отражения, в которых у растений, находящихся в разных условиях, наблюдаются максимальные различия: 550—660 нм, 660—680 нм, 800—890 нм, 1650 нм. Выбор времени исследований диктуется поставленной задачей. Точность интерпретации дистанционных результатов и прогноз развития ситуации существенно повышаются при использовании априорной и синхронной наземной информации.

Анализируя приведенные факты, необходимо признать наличие сложной непрямой связи между аномалией УВ в приповерхностном слое, обусловленной процессами миграции из залежи УВ, и растениями в пределах такой аномалии. Физико-химические процессы преобразования почв вследствие миграции флюидов (УВ и других), развитие специфической микрофлоры, отличный от фонового температурный режим и прочие, как прямо, так и опосредованно влияют на формирование флоры, которая состоит как из аллохтонных так и автотонных видов и разновидностей, адаптированных к аномальным условиям окружающей среды, и находящихся в состоянии адаптации.

Аномалии растительности (флоры) в пределах геохимических аномалий, обусловленных залежами УВ, могут дублировать аномальные флоры, например, такие, что сформировались на полиметаллических месторождениях, поскольку доступность отдельных металлов в почвах в обоих случаях изменяются [16, 21]. Многочисленные литературные данные свидетельствуют о том, что нет однозначной зависимости между наличием, доступностью металлов и их содержанием в корнеобитаемом слое и разных частях растений. Более того, есть много механизмов адаптации к такого рода воздействию, выявлена схожесть признаков реакции на геохимическую аномалию и реакций на прочие стрессы и аномалии [16, 19, 21, 38]. Все это справедливо и для действия других факторов среды. Аналогичная ситуация отмечается и в отношении отражательных характеристик растений при воздействии стрессовых факторов [14, 16, 21, 36, 37].

Следует признать, что в лабораторных условиях невозможно смоделировать бесчисленные вариации природных условий для целей выработки однозначных алгоритмов определения какого-либо фактора по дистанционно полученным спектральным откликам растительных объектов, в связи с чем каждый натурный эксперимент является по сути уникальным и требует собственного наземного обеспечения. Однако тенденции развития оптических аппаратурных средств и технологий дистанционного зондирования для фитодиагностики заключаются

во все большем приближении их к уровню информативности лабораторных исследований.

1. Алексеев В. А. Световой режим леса. — Л.: Наука, 1975.— 227 с.
2. Архипов А. И., Перерва В. М., Левчик Е. И. и др. Оптичні аномалії рослинності як індикатор покладів вуглеводнів // Теоретичні та прикладні проблеми нафтогазової геології. — Київ, 2000.—С. 52—57.
3. Бранд А. Б., Таегева С. В. Оптические параметры растительных организмов. — М.: Наука, 1967.—301 с.
4. Василевская В. К., Антонова И. С. К вопросу о пластичности строения листа // Вопросы экологической анатомии и физиологии растений: Тр. Петергофского биол. ин-та. — Л.: ЛГУ, 1978.—№ 27.—С. 5—20.
5. Выгодская Н. Н., Горшкова Н. И. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. — Л.: Недра, 1987.—248 с.
6. Глотов Н. В., Максименко О. Е., Орлинский Д. Б. Экологогенетическая изменчивость клевера белого (*Trifolium repens* L.) в природных популяциях Среднего Приобья // Экология.—1995.—№ 5.—С. 344—346.
7. Дистанционное зондирование: количественный подход / Под ред. Ф. Свейна, Ш. Дейвиса. — М.: Мир, 1983.— 415 с.
8. Ефременко В. В., Мошков А. В., Семенов А. А. и др. Метод выявления угнетенной растительности по данным спектроизонального сканера // Исслед. Земли из космоса.— 1997.—№ 6.—С. 3—9.
9. Жуков Б. С. Физические основы дистанционного зондирования // Итоги науки и техники. Сер. Исслед. Земли из космоса.—1987.-1.—С. 6—78.
10. Журавель Н. Е., Васильев А. Н. Закономерности формирования аномальных концентраций металла в почвенно-растительном покрове Шебелинского месторождения // ДАН УССР. Сер. Б. Геол., хим. и биол. науки.—1987.— № 3.—С. 14—17.
11. Зорькин Л. М., Карус Е. В., Кузнецов О. Л. и др. Явление парагенезиса субвертикальных зонально-кольцевых геофизических, геохимических и биохимических полей в осадочном чехле // Открытие от 24.07.80, № 234.
12. Заленский В. Р. Материалы к количественной анатомии различных листьев одних и тех же растений // Изв. Киев. политехн. ин-та.—1904.—4, Вып. 1.—214 с.
13. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. — М.: Изд-во АН СССР, 1947.—271 с.
14. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии. — М.: Мир, 1988.—349 с.
15. Кондратьев К. Я., Козодоров В. В., Федченко П. П. Аэрокосмические исследования почв и растительности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986.—229 с.
16. Косячин А. В., Алексеева-Попова Н. В. Действие тяжелых металлов на растения и механизмы металлоустойчивости // Растения в условиях экстремального минерального питания. — Л.: 1983.—С. 5—22.
17. Кочубей С. Н., Кобец Н. И., Шадчина Т. М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. — К.: Наук. думка, 1990.—136 с.
18. Лялько В. И., Вульфсон Л. Д., Жарый В. Ю. и др. Аэрокосмические методы в геоэкологии. — К.: Наук. думка, 1992.—204 с.
19. Мелешко К. Е. Спектрофотометрические исследования природных покровов Земли. Стандартизация методики измерения и обработки. — Л. Недра, 1976.—112 с.
20. Михайлов А. В., Саблина И. Ю. Миграция углеводородов и

- возможности установления отражения их ареалов в ландшафте аэрокосмическими методами // Прогнозирование структур осадочного чехла на основе комплексной интерпретации и обработки на ЭВМ аэрокосмических и геолого-геофизических данных. — М., 1990.—С. 21—33.
21. Мовчан Л. И., Каневский В. А., Семиначевский В. Д. и др. Фитоиндикация в дистанционных исследованиях. — К.: Наук. думка, 1993.—305 с.
22. Обидалов А. И. Дешифрирование снимков для целей сельского хозяйства. — М.: Недра, 1982.—145 с.
23. Пиковский Ю. И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. — М.: Изд-во Моск.ун-та, 1993.—208 с.
24. Перерва В. М. Вероятная природа линеаментов, выявляемых аэрокосмическими методами backlash // Геол. журн.—1999.—№ 1.—С. 66—76.
25. Перерва В. М. Спутниковая информация в изучении флюидопроводящих структур литосферы // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 2/3.—С. 126—132.
26. Перерва В. М., Архипов А. И. Явление аномального изменения физиологии растений в зоне флюидогеодинамических структур литосферы // Доп. НАН України.—1999.—№ 10.—С. 111—114.
27. Перерва В. М. Геоинформационный уровень ландшафтов в изучении геофлюидодинамических структур литосферы дистанционными методами // Науч. тр. Нац. Горной академии Украины.—2000.—1, № 9.
28. Перерва В. М. Геофлюидодинамические структуры литосферы и современные ландшафты // Український географ.
- журн.—2000.—№ 4.—С. 12—18.
29. Перерва В. М., Архипов А. И., Левчик Е. И. и др. Аэрокосмические исследования в решении нефтегазогеологической супер-задачи — прямом поиске залежей углеводородов // Науч. тр. Нац. Горной академии Украины.—1999.—2, № 7.—С. 67—71.
30. Семириков Л. Ф., Завьялова Н. С. Влияние нефтяных загрязнений на изменчивость популяции канареечника тростникового (*Phalaroides arundinacea*) // Экология.—1990.—№ 2.—С. 31—34.
31. Угрехелидзе Д. Ш. Метаболизм экзогенных алканов и ароматических углеводородов в растениях. — Тбилиси: Мецниерба, 1976.—222 с.
32. Шульгин И. А. Морфологические приспособления растений к свету. — М.: Изд-во МГУ, 1963.—74 с.
33. Allen W. A., Gausman H. W., Richardson F. J. Willstatter — Stoy theory of leaf reflectance evaluated by ray tracing // Appl. Opt.—1973.—N 12.—P. 2448—2454.
34. Gausman H. W., Cardenas R. Light reflectance by leaflets of pubescent, normal and glabrous soebeen lines // Agron. J.—1973.—65, N 7.—P. 837—838.
35. Goetz A. F. H., Rowan L. C. Geologic remote sensing // Science.—1981.—211, N 4484.—P. 781—791.
36. Grant L. Diffuse and spectral characteristics of leaf reflection // Remote Sens. Environ.—1987.—22, N 2.—P. 309—322.
37. Labovitz M. L., Masuoka E. J., Bell R., et al. The application of remote sensing to geobotanical exploration for metal sulfides — results from the 1980 field season at Mineral // Econ. Geol.—1983.—78, N 4.—P. 750—760.

## Прогнозирование зон развития вторичных коллекtorов по спутниковым данным

**В. М. Перерва, Т. И. Костина**

Центр аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины, Киев

Геологическая и экономическая эффективность процессов поиска, разведки и, в особенности, разработки месторождений многих полезных ископаемых связаны с характером коллекторских свойств вмещающих пород и продуктивных горизонтов (месторождения нефти и газа, рудных полезных ископаемых, термальных, бальнеологических, питьевых и минеральных вод, алмазов и некоторые другие). При решении многих инженерно-геологических задач информация о зонах развития процессов разуплотнения пород, их вторичных изменениях, миграции по таким зонам пластовых и глубинных флюидов, как жидких, так и газообразных, нередко имеет первостепенное значение. Указанные зоны часто играют роль участков локализации процессов разрядки геодинамических напряжений в литосфере и поэтому представляют нередко серьезную сейсмическую опасность. Одним словом, речь идет об изучении весьма важных геологических процес-

сов и формируемых ими структур в теле литосфере.

Попытки создания методов эффективного изучения зон разуплотнения и развития вторичных высокопроницаемых коллекторов предпринимались ранее, предпринимаются и сейчас. Пожалуй, главным из направлений создания таких методов следует назвать геофизическое. К сожалению, приходится констатировать, что до настоящего времени такой методики этого направления нет. Попытки решать задачу сейсмическими методами, методами высокоточной гравиметрии и магнитометрии, по крайней мере в пределах нефтегазоносных территорий, не дали ощутимого положительного результата. Так, попытки заложения эксплуатационных скважин с ожидаемыми удовлетворительными суточными дебитами на Чернечинско-Хухранском нефтяном месторождении по геофизическим данным не увенчались успехом, что в конечном итоге поставило в трудное положение сам процесс разра-