



# Тундра, нефть и радиоволны

## Поиск нефтяных загрязнений почвы методами микроволнового зондирования

---

АНДРЕЙ РОМАНОВ

Зам. директора по научной работе Института водных и экологических проблем СО РАН, д.т.н.

Площадь Российской Арктики составляет около девяти миллионов квадратных километров. Основная часть всей сухопутной арктической территории занята вечной мерзлотой, «спасающейся от таяния» под сплошным ковром тундровой растительности. Разрушение очень уязвимых экосистем тундры может привести к интенсивному таянию вечной мерзлоты и, как результат, к неприятным для всего человечества и даже непредсказуемым последствиям, связанным с деградацией растительного покрова и вечной мерзлоты. Проще говоря, более сильным прогреванием почвы на участках с уничтоженной растительностью, возрастанием скорости испарения и, как результат, поступлением в атмосферу дополнительных количеств водяного пара, способствующего увеличению парникового эффекта. А поскольку многие горизонты вечной мерзлоты, помимо всего прочего, также содержат метан, то при деградации растительности, способствующей деградации вечной мерзлоты, возможно многократное возрастание содержания метана в атмосфере, что угрожает привести к серьезным климатическим изменениям на всей планете. Таким образом, растительный покров тундры, предохраняющий вечную мерзлоту от таяния и деградации, играет исключительно важную роль в сохранении энергетического баланса арктической территории.

## ОПАСНОСТЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Основными причинами деградации тундровой растительности являются: углеводородное загрязнение территорий в результате интенсификации добычи нефти и газа в Арктике; перевыпас одомашненного северного оленя; тепляющее влияние городов; происходящие климатические изменения, включая таяние морских льдов и вечной мерзлоты. Для северных стран Европы и арктических территорий, значительную часть которых занимает тундра, деградация растительного покрова также связана с изменением видового состава растительных сообществ и исчезновением отдельных видов растительности (см. «Вечная мерзлота (ЯНАО)»).

Промышленное освоение нефтегазовых месторождений может быть сопряжено с ухудшением экологической ситуации окружающей среды, деградацией вечной мерзлоты и тундровой растительности. Техногенное загрязнение арктических экосистем углеводородами с высокой долей вероятности наблюдается в нефтеносных провинциях, на участках нефтяных месторождений и нефтяных промыслах, а также на путях транспортировки нефтепродуктов на нефтеперерабатывающие предприятия. Это предопределяет необходимость изучения экологического

состояния окружающей среды до начала интенсивной нефтегазодобычи (см. «Участки деградации растительного покрова тундры (вид с вертолета)»).

Общеизвестно, что загрязнение почвы нефтью и продуктами ее переработки ведет к деградации земель, уничтожению почвенной биоты, а также снижению плодородных качеств, проникновению токсичных загрязнителей в нижние почвенные горизонты, их пространственному распространению с грунтовыми и подземными водами. При взаимодействии нефти и нефтепродуктов с водой образуются водно-масляные эмульсии. В результате этого изменяется фазовый состав и физические свойства воды. Нефтяное загрязнение почвенного покрова в условиях отрицательных температур ведет к изменению электрофизических свойств сезонно-мерзлых и многолетне-мерзлых почв (вечной мерзлоты). В природных условиях (на месторождениях, участках нефтедобычи и нефтепереработки) нефть может заполнять все поровое пространство почвы, пропитывая ее на глубину до 10–20 см.

## ИНСТРУМЕНТЫ ПОИСКА

В настоящее время при количественных оценках уровня нефтяных загрязнений наибольшее распространение

### ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА (ЯМАЛО-НЕНЕЦКИЙ АВТОНОМНЫЙ ОКРУГ)



Источник: фото автора

получили контактные методы инфракрасной спектроскопии, ультрафиолетовой люминесценции, газовой и газожидкостной хроматографии. Также исследуется возможность использования электромагнитных волн микроволнового диапазона для оценки свойств нефти и нефтепродуктов. Кроме того, совместный анализ инфракрасных спектров и диэлектрических характеристик нефти позволяет оценить качество нефтепродуктов.

Нефть, относящаяся к категории гидрофобных жидкостей, при попадании в почву обволакивает почвенные частицы водоотталкивающей нефтяной пленкой, что приводит к снижению доли связанной воды в почве. При увлажнении почвы поверхность почвенных частиц, не покрытая водоотталкивающей нефтяной пленкой, сорбирует воду с образованием категории связанной воды. Диэлектрические характеристики связанной воды заметно отличаются от диэлектрических характеристик свободной воды, почвы и нефти, а диэлектрические характеристики влажной почвы,

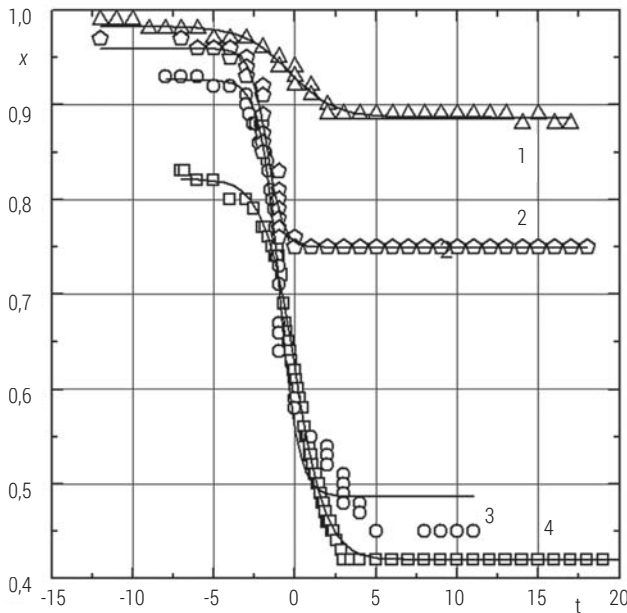
загрязненной нефтью, соответственно отличаются от диэлектрических характеристик незагрязненной почвы. Присутствие нефтяных добавок ведет к изменению радиоизлучательных характеристик почвы. При одной и той же влажности в почве, загрязненной нефтепродуктами, будет содержаться большее количество свободной воды по сравнению с той же почвой, не содержащей нефтяных добавок. Это дает возможность разработать алгоритм оценки степени загрязненности почвы по изменению ее диэлектрических и радиоизлучательных характеристик. Следует отметить, что в естественных условиях загрязнению нефтью и продуктами ее переработки подвергаются влажные почвы (за исключением аридных территорий с жарким климатом). Соответственно, вытеснение связанной воды нефтью может происходить в течение длительного времени в результате периодических процессов иссушения и увлажнения, зависящих от погодных условий.

#### УЧАСТКИ ДЕГРАДАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ТУНДРЫ (ВИД С ВЕРТОЛЕТА)



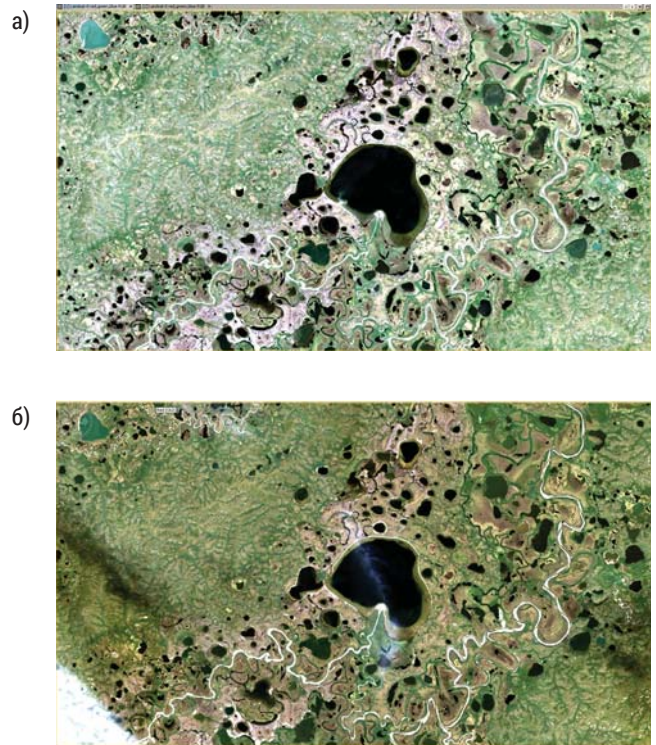
Источник: фото автора

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ЖИВОГО ЯГЕЛЯ (1), ОТМЕРШЕГО ЯГЕЛЯ (2), СФАГНУМА (3) И ТОРФА (4)



Источник: составлено автором

ФРАГМЕНТЫ СНИМКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СО СПУТНИКА LANDSAT-8 В 2016 г. 1 июля (а) и 15 июля (б)



Источник: Институт водных и экологических проблем СО РАН

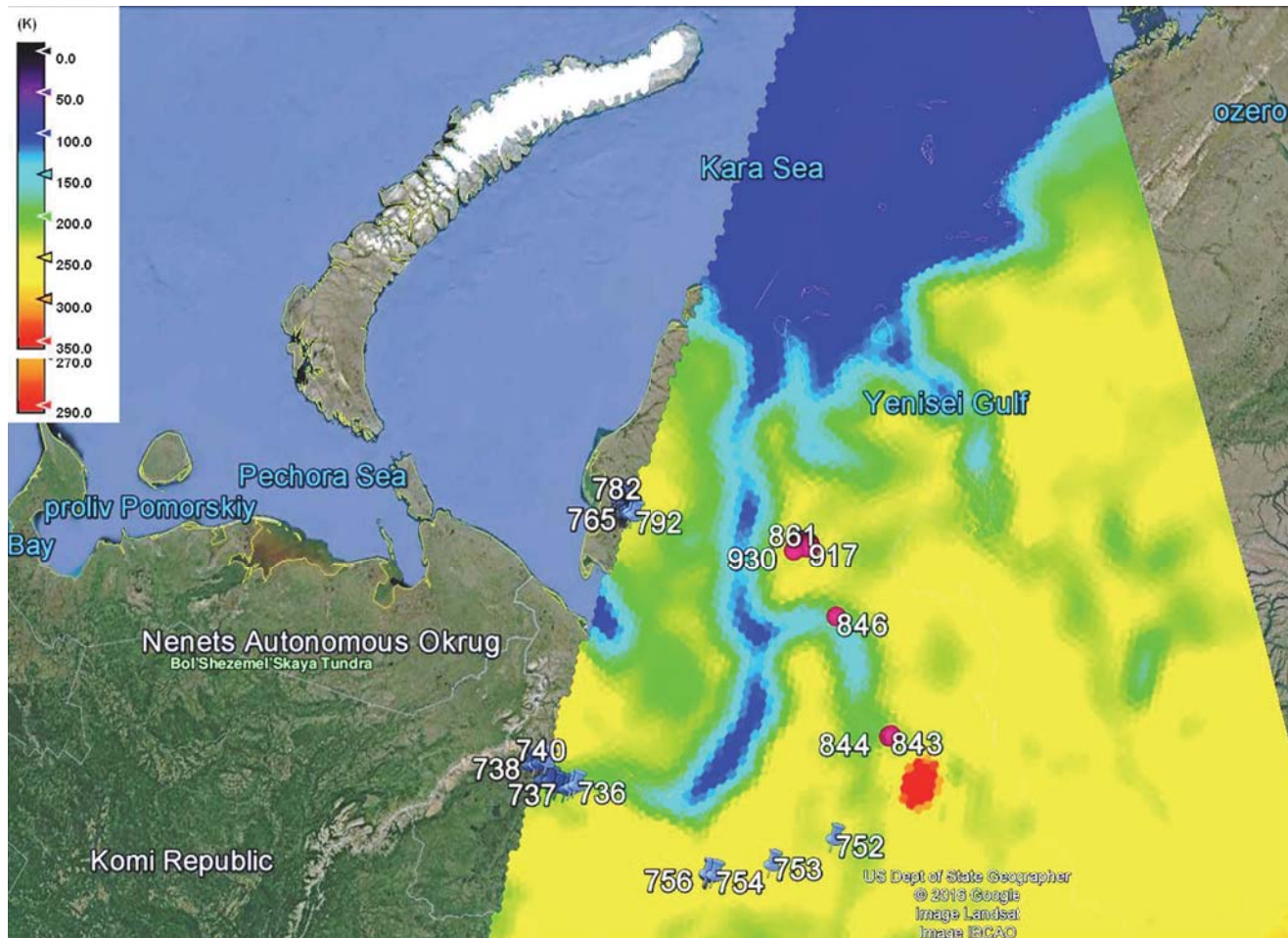
В связи с огромной территорией, занимаемой тундрой и ее труднодоступностью, действенный контроль негативных изменений, происходящих с тундровой растительностью и вечной мерзлотой, возможен только с использованием высоко-оперативных методов дистанционного зондирования. При этом возникает проблема интерпретации данных дистанционного зондирования арктических территорий, характеризующихся разным типом подстилающей поверхности (вечная мерзлота, засоленные почвы, талики, прибрежная зона, многолетние льды с разной степенью солености, открытая соленая вода, пресные водоемы, периодически замерзающие, с наличием льда разной толщины). Для этих целей используются данные спутникового зондирования в оптическом, инфракрасном, микроволновом диапазонах, проводятся наземные исследования и лабораторные измерения диэлектрических характеристик почв и воды.

В зимний период большая часть арктической территории в основном закрыта облаками. По этой причине репрезентативные спутниковые данные оптического и инфракрасного диапазонов немногочисленны (не более двух-трех информативных снимков в месяц). В таких условиях спутниковые данные микроволнового диапазона становятся, пожалуй, единственным источ-

ником ежедневной информации о характеристиках подстилающей поверхности на больших пространственных масштабах.

Однако микроволновое излучение подстилающей поверхности зависит от многих параметров, в частности, от температуры, влажности и биомассы растительности, типа подстилающей поверхности (вода, незамерзшая или мерзлая почва) и ее физических свойств (для воды – температура и соленость, для почвы – температура, влажность, глубина промерзания). Определить влажностные характеристики почв и растительности позволяет комбинирование микроволновых и оптических данных, полученных в разные периоды времени. Совместная комплексная обработка радиолокационных и многоспектральных оптических изображений повышает достоверность дистанционной классификации земных покровов и количественной оценки биофизических параметров растительности. Разработка контактных и дистанционных методов оценки состояния растительности тундры и физических характеристик многолетнемерзлых почв основана на детальном изучении особенностей распространения и взаимодействия электромагнитных волн с разными типами подстилающей поверхности.

КАРТА-СХЕМА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОЯРКОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SMOS (8 августа 2016 г.)



Источник: Институт водных и экологических проблем СО РАН

### ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для возможности использования данных дистанционного зондирования необходимо изучить закономерности взаимодействия электромагнитных волн разных диапазонов с элементами растительности, водой, талой и мерзлой почвой. Калибровка и валидация спутниковых данных предполагают использование тестовых полигонов с известными излучательными характеристиками подстилающей поверхности. Совместное исследование радиоизлучательных характеристик почвенного и растительного покрова в оптическом и микроволновом диапазонах показало, что на результаты дистанционных измерений оказывают влияние минералогический состав почвы, ее текстура, влажность, содержание минеральных солей и загрязняющих веществ. Совокупное влияние этих факторов ведет к заметным пространственно-

временным вариациям радиоярких характеристик подстилающей поверхности.

Спутниковые данные микроволнового диапазона выражаются в единицах радиоярких температур, представляющих собой произведение коэффициента излучения  $\chi$  подстилающей поверхности и ее термодинамической температуры. Как следует из результатов лабораторных измерений, коэффициенты излучения сухой почвы  $\chi_{П} = 0,95$ , нефти  $\chi_{Н} = 0,93$ . Добавление нефти в сухую почву ведет к незначительному понижению ее коэффициента излучения до значения  $\chi_{ПН} = 0,92$ . В большей степени наблюдается влияние нефтяных добавок на радиоизлучательные свойства влажной почвы. В этом случае коэффициенты излучения варьируют в пределах от 0,4 (очень влажная почва) до 0,8 (слабо увлажненная почва). Влияние нефтяного загрязнения ведет к изменению коэффициентов излу-

чения загрязненной почвы на 10–20%. При измерении коэффициентов излучения подстилающей поверхности с погрешностью не более 2% подобные изменения могут быть легко зафиксированы современными радиометрическими приборами.

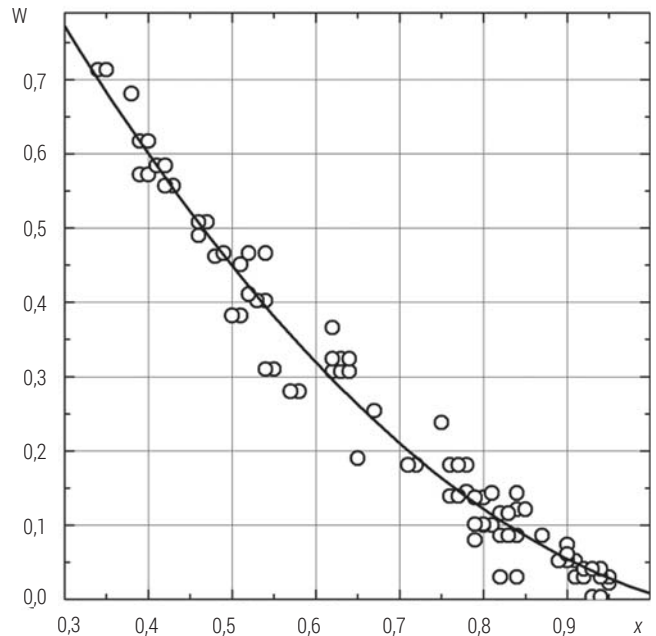
На коэффициент излучения и радиояркость температуру подстилающей поверхности тундры оказывают влияние физические свойства почвенного покрова, а также характеристики растительности. В первую очередь, содержащаяся в растениях вода, фазовый состав и диэлектрические свойства которой могут различаться для разных видов растительности, а также для разных элементов растительности одного вида (корни, листья, стебель). При отмирании растительности, образовании перегноя, торфа происходит изменение фазового состава воды и, соответственно, изменение диэлектрических характеристик растительности. Загрязнение растительного покрова нефтью, а также продуктами и отходами нефтепереработки ведет к существенному изменению диэлектрических характеристик как живой, так и погибшей растительности (см. «Температурные зависимости коэффициентов излучения от температуры для живого ягеля (1), отмершего ягеля (2), сфагнома (3) и торфа (4)»).

## ПРИМЕР ЯМАЛА

Значительные запасы нефти и газа разведаны в Ямало-Ненецком автономном округе, в частности на полуострове Ямал и на Гыданском полуострове. Космический мониторинг тундры включал в себя обработку данных спутников Landsat и SMOS, полевые измерения физических параметров подстилающей поверхности, а также лабораторные измерения диэлектрических характеристик образцов почвы и растительности, отобранных с тестовых участков.

Анализ снимков спутника Landsat, сделанных 1 и 15 июля 2016 года в оптическом диапазоне, указывает на их различие, которое может быть связано с изменением увлажненности территории, сокращением площади болот и затопленных территорий, а также усыханием тундровых озер. Изменение водного режима тундры в результате уменьшения влажности поверхностного слоя способствует угнетению тундровой растительности. На спутниковых снимках участки подстилающей поверхности, соответствующие разным типам ландшафтов, окрашены в различные псевдоцвета: русла рек – белый цвет; водная поверхность озер – черный цвет; высохшие озера, заболоченные участки поймы, тундровая растительность – зеленый цвет разных оттенков; участки со слабо развитым (возможно, частично деградированным) растительным покровом на водоразделах и возвышенностях – серый и коричневый цвета; участки с полностью деградированным растительным покровом – желтый цвет. По спутниковым снимкам может быть оценена суммарная площадь деградированных территорий. Использование ретроспективных и современных данных позволяет установить

## ОБОБЩЕННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОБЪЕМНОЙ ВЛАЖНОСТИ ОТ КОЭФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТУНДРЫ (ПОЧВА, РАСТИТЕЛЬНОСТЬ)



Источник: составлено автором

тренды деградации растительного покрова тундры (см. «Фрагменты снимков, полученных со спутника Landsat-8 в 2016 г.: 1 июля (а) и 15 июля (б)»).

**Космический мониторинг тундры включал в себя обработку данных спутников Landsat и SMOS, полевые измерения физических параметров подстилающей поверхности, а также лабораторные измерения диэлектрических характеристик образцов почвы и растительности, отобранных с тестовых участков.**

По данным микроволнового радиометра MIRAS, установленного на спутнике SMOS, построена карта-схема пространственного распределения радиояркостьных температур (нисходящий пролет 8 августа 2016 года в 04:20 по местному времени). Цифрами обозначены точки отбора проб во время полевых исследований. Выделяется участок с высокой радиояркостью температурой (тепловой остров), соответ-

## ОТБОР ПРОБ ГРУНТА СО ДНА ОБСКОЙ ГУБЫ



Источник: фото автора

ствующий населенному пункту. Также видно, что территории, прилегающие к Обской и Гыданской губе, характеризуются пониженными значениями радиоярких температур. Это может быть связано с более высокой влажностью подстилающей поверхности по сравнению с удаленными от побережья территориями (см. «Карта-схема пространственного распределения радиоярких температур по данным спутника SMOS (8 августа 2016 г.)»).

Для интерпретации данных дистанционного зондирования в лабораторных условиях проводились измерения диэлектрических и радиоизлучательных характеристик почв, воды, растительности. По данным диэлектрических измерений была рассчитана обобщенная зависимость объемной влажности  $W$  почвенно-растительного слоя от коэффициента излучения подстилающей поверхности  $\chi$  (см. «Обобщенная зависимость объемной влажности от коэффициента излучения подстилающей поверхности тундры (почва, растительность)»).

По спутниковым данным в оптическом, инфракрасном и микроволновом диапазонах, а также с использовани-

ем установленной обобщенной зависимости  $W(\chi)$ , была построена карта-схема влажности почвенного покрова Гыданского полуострова. На участках, соответствующих акваториям Обской и Тазовской губы, влажность не определялась. Темные участки и полосы соответствуют пикселям, для которых данные MODIS отсутствуют, поэтому восстановление влажности невозможно. Повышенные значения влажности ( $W = 0,34-0,40$ ) соответствуют береговым зонам. Центральные территории Гыданского полуострова характеризуются пониженными значениями объемной влажности, находящимися в пределах от 0,12 до 0,14.

Установленные закономерности поведения диэлектрических и радиоизлучательных характеристик почв, содержащих в качестве загрязнителей нефтяные добавки, могут быть использованы при разработке измерительных приборов, а также контактных диэлькометрических и дистанционных микроволновых методов оценки степени загрязненности почвенного покрова, обнаружения загрязненных участков, оценки нефтенасыщенности почвенных горизонтов при измерениях в нефтегазоносных скважинах. ❏