

Многолетне- и сезонно-мерзлые почвогрунты Западной Сибири: методология и практика аэрокосмической дистанционной СВЧ диагностики в пространственно-временных координатах

В.В. Мелентьев^{1,2}, И.В. Мателенок¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67

² Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, 199034 Россия, Санкт-Петербург, 14-я Линия В.О., 7б, офис 49
E-mail: vladimir.melentyev@niersc.spb.ru

Приводятся результаты комплексного анализа свойств многолетнемерзлых и сезонно-мерзлых почвогрунтов Западной Сибири с использованием картосхем пространственно-временной изменчивости радиояркостной температуры (РЯТ), построенных на основе 6.9 ГГц данных с СВЧ радиометра AMSR-E. Особенности распределения РЯТ по широте в разные периоды года соотнесены с границами физико-географических зон. Для тундровой зоны выполнено сопоставление спутниковой СВЧ информации и результатов контактных измерений с площадки геокриологического стационара Марре-Сале.

The results of comprehensive analysis of the properties of Siberian permafrost and seasonally frozen grounds with using maps displaying spatial and temporal radiobrightness temperature (Tb) variations in Western Siberia based on AMSR-E 6.9 GHz data are presented. Latitudinal Tb distribution is compared with the location of the boundaries of different landscape zones. In situ observations from geocryological station Maresale are involved for satellite data validation for tundra zone.

Задача создания методов и средств картирования параметров состояния многолетнемерзлых (ММГ) и сезонно-мерзлых (СМГ) почвогрунтов в настоящее время является крайне актуальной. Даже незначительное повышение температуры многолетнемерзлых грунтов (ММГ), находящихся в состоянии неустойчивого термодинамического равновесия, способно вызвать их переход в категорию сезонно-мерзлых (СМГ) и спровоцировать катастрофические изменения в состоянии инфраструктуры и природных комплексов. В современных условиях, согласно развиваемой идеологии, названная задача должна решаться с применением технологий дистанционной аэрокосмической активной и пассивной СВЧ диагностики, обеспечивающей возможность всепогодного подповерхностного зондирования толщ почвогрунтов.

Метод спутниковой СВЧ радиометрии, предложенный в середине 1960-х годов группой советских ученых, в следующие годы был использован для изучения ММГ и СМГ [2]. На основе результатов самолетной мультиспектральной СВЧ съемки, осуществлявшейся с борта самолета-лаборатории ГГО в Арктике, горах Кавказа и Средней Азии, натурных экспериментов по исследованию излучательных свойств различных типов подстилающих поверхностей, выполнявшихся на полевой базе п. Воейково, нами была высказана идея о том, что радиояркостная температура системы «Земля-атмосфера» (РЯТ) может рассматриваться в качестве важнейшего климатического показателя ее состояния и динамики развития [4].

С конца 1980-х гг. в России и за рубежом был выполнен ряд работ, посвященных методологии и практике пассивного СВЧ зондирования мерзлых грунтов [1, 4 - 7]. В рамках этих исследований, опиравшихся на материалы СВЧ съемки со спутников нового поколения, были достигнуты определенные успехи в различении мерзлого и талого состояния почвогрунтов, в восстановлении значений их температуры и влажности. Однако анализу связей между пространственно-временным распределением

измеряемых РЯТ и изменчивостью свойств ММГ и СМГ, а тем более задачам физико-географического районирования и типизации их региональных климатических особенностей до настоящего времени не уделялось особого внимания.

Пионерской работой этого направления стала наша статья [6]. Выполненный в ней анализ данных многолетнего архива СВЧ съемки ММГ и СМГ с борта ИСЗ Nimbus-7 и DMSP по трансекту, совпадающему с меридианом 70° ВД, позволил сформулировать новый климатический подход к использованию спутниковой СВЧ информации, предполагающий исследование изменчивости не мгновенных значений радиояркостных температур, а усредняемых за декаду, месяц или сезон. В работе [6] по данным измерений СВЧ радиометров SMMR и SSM/I на частоте 19 ГГц за 1978-1999 гг. оказался выявлен тренд увеличения январских и февральских среднемесячных значений РЯТ, отражающий общую тенденцию региональных климатических изменений в приполярной области. В ходе анализа материалов СВЧ съемки были зафиксированы различия в сроках начала оттаивания верхнего слоя мерзлого грунта в теплые и холодные годы. Важным результатом исследования [6] стало обнаружение контрастов РЯТ различных типов подстилающей поверхности и тенденций внутригодового и межгодового изменения распределения РЯТ по широте.

Настоящая работа продолжает указанное направление исследований. Нами использованы данные измерений с канала 6.9 ГГц СВЧ радиометра AMSR-E, выполняющего съемку земной поверхности с ИСЗ «Aqua» с разрешением на местности от 5.4 км (для частоты зондирования 89 ГГц) до 56 км (для 6.9 ГГц) начиная с 2002 г. Выбор для анализа информации с сантиметрового канала объясняется большей толщиной зондируемого слоя и меньшим влиянием собственного излучения атмосферы. Нами была выполнена тематическая обработка данных из архива центра NSIDC Университета Колорадо, относящихся к исследованному в работе [6] трансекту, совпадающему с меридианом 70° ВД. В рамках настоящей статьи обсуждаются результаты анализа СВЧ измерений за 2006 и 2007 годы, которые отличались степенью суровости зимнего сезона (более сурового для 2006 г).

Исходные данные из архива NSIDC, представленные в виде изображений-мозаик, отражают ежесуточное распределение РЯТ в пределах Северного полушария. В результате отбора из каждой мозаики пикселей, относящихся к меридиану 70° ВД, и сведения соответствующих значений РЯТ в оперативную базу данных была получена серия планшетов (картосхем) широтной и годовой посуточной изменчивости РЯТ (рис. 1 а, б). Анализ таких изображений, исключительно информативных и удобных для визуализации и анализа в ГИС объемного массива спутниковых СВЧ данных, открывает возможность исследования изменчивости СМГ и ММГ в пространственно-временных координатах для любого участка рассматриваемого трансекта. В ходе тематической обработки сформированной базы данных выполнена процедура соотнесения структуры пространственно-временной изменчивости РЯТ с имеющейся информацией о физико-географическом районировании исследуемого региона.

Меридиан 70° ВД пересекает с севера на юг различные ландшафтные зоны, водные и наземные экосистемы, проходя через Карское море, тундру, лесотундру п-ова Ямал, бореальные леса Западносибирской равнины, лесостепи юга Тюменской области и степи Северного Казахстана. При этом зона непрерывного распространения многолетнемерзлых пород переходит в области прерывистого и островного распространения ММГ, сменяясь затем зоной сезонного промерзания почвогрунтов. Выбор для анализа разреза вдоль меридиана 70° ВД обусловлен существенным засолением почвогрунтов в пределах п-ова Ямал, которое способствует повышенной чувствительности ММГ к климатическим изменениям.

На рис. 1. представлены результаты тематической обработки данных AMSR-E, относящихся к первой половине 2006 (а) и 2007 (б) гг. (6.9 ГГц, Н-поляризация). На изображениях приведены границы обследованных физико-географических зон, значениям РЯТ соответствуют оттенки серого. Распределение РЯТ участков воды, льда и поверхности суши характеризуется наличием неоднородностей и контрастов, соотношение которых с границами широтных зон позволяет произвести их предварительную классификацию по виду профилей СВЧ сигнатур.

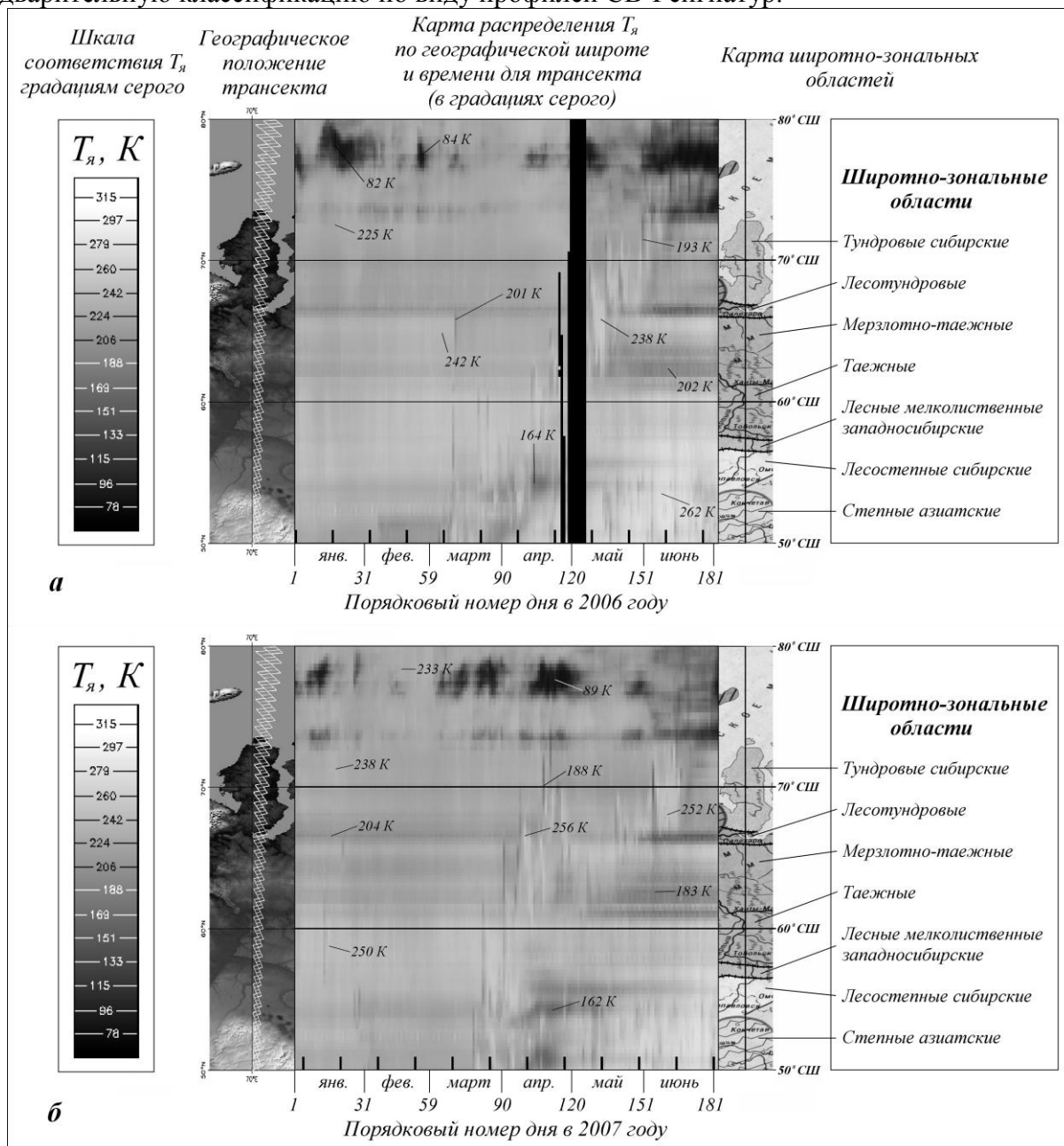


Рис. 1. Планшеты (картосхемы) пространственно-временного распределения РЯТ различных типов подстилающей поверхности вдоль меридиана 70° ВД, соотнесенного с данными физико-географического районирования. Западная Сибирь, ИСЗ «Аква», СВЧ радиометр AMSR-E, $f = 6.9$ ГГц, Н поляризация. 2006 (а) и 2007 (б) гг.

На широте $\sim 73.5^\circ - 74^\circ$ СШ и $77^\circ - 79^\circ$ СШ по существенному снижению РЯТ (вплоть до уровня 90 К) вдоль временной оси планшета обнаруживаются моменты образования стационарных полей, располагающихся соответственно около северной оконечности п-ова Ямал и у мыса Желания [4]. Разброс значений РЯТ на разных

временных отрезках обусловлен степенью развития полыней – соотношением площади, занятой льдом и открытой водой. Периоды максимального развития полыней в зимний и весенний сезоны приходятся в 2006 г. на январь, в 2007 г. – на март и апрель.

Анализ распределения РЯТ областей, относящихся к континентальной части трансекта, позволил нам выявить периоды «максимальной температуры мерзлого состояния почвогрунтов». Для таких периодов характерно одновременное выполнение условия максимума коэффициента излучения, свойственного мерзлому состоянию почвогрунтов, и наибольшей приближенности термодинамической температуры почвогрунтов (ТДТГ) к температуре начала их оттаивания, что отражается в весенне-летнем повышении РЯТ относительно зимних значений до некоторого порога, за которым следует резкое и затяжное снижение РЯТ под воздействием процессов таяния.

Усредненное за зимний сезон (до первых оттепелей) значение РЯТ для тундровой части трансекта составляет 224 К в 2006 г. и 225.5 К в 2007 г. Однако в целом для континентальной части трансекта средняя РЯТ зимой 2007 г. оказывается на 3 К меньше, чем в 2006 г. (за счет снижения РЯТ подстилающих поверхностей в 2007 г. по отношению к 2006 г. в пределах таежной, степной и лесостепной зон). Продолжительность периода стабильно мерзлого состояния почвогрунтов различается для разнесенных по широте участков трансекта. Для лесостепей и зоны южной тайги (55° - 62° СШ) первые оттепели, проявляющиеся в резких колебаниях РЯТ с кратковременным ее уменьшением и последующим восстановлением до исходного уровня, в 2007 году наблюдались в конце марта, для тундровой зоны (66.5° - 70° СШ) – в середине апреля (в 2006 году соответственно в конце марта и в середине мая). На южных участках трансекта в ряде случаев резкое однодневное снижение РЯТ, соответствующее оттепели, было зафиксировано даже в январе-феврале. Выявленный по данным AMSR-E период окончательного схода снежного покрова и оттаивания верхнего слоя почвогрунтов в пределах п-ова Ямал, в 2006 г. и 2007 г. пришелся на июнь, что подтверждается результатами измерений *in situ* по геокриологическому стационару Марре-Сале.

Для валидации данных СВЧ съемки была исследована корреляция между характеристиками принимаемого радиометром AMSR-E излучения и параметрами подстилающей поверхности (ТДТГ, толщиной снежного покрова и температурой приземного слоя воздуха), значения которых были получены из архива измерений *in situ* геокриологического стационара Марре-Сале. Нами был сделан вывод, что для тундровой зоны, южная граница которой на долготе 70° ВД практически совпадает с границей зоны непрерывного распространения ММГ, методологически целесообразно разбиение годового цикла изменений РЯТ на несколько временных периодов, для которых обнаруживается различная степень внутрисезонных вариаций и контрастов уровня сигнала. Зимний и летний сезоны характеризуются отсутствием резких перепадов РЯТ и высокой корреляцией между ТДТГ и РЯТ (с практически линейной связью между этими величинами – [3]). В периоды весенних и осенних циклов многократного оттаивания-промерзания, когда содержание жидкой влаги в почвогрунтах сильно варьирует ото дня к дню, а РЯТ изменяется скачкообразно, корреляция между ТДТГ и РЯТ минимальна.

Участки темнохвойной кедрово-елово-пихтовой тайги (57° - 61° СШ) характеризуются очень высокими значениями РЯТ по сравнению с другими участками трансекта на протяжении всего годового цикла. Даже в период интенсивного весеннего снеготаяния значимого снижения РЯТ в этих областях не происходит. По-видимому, это связано с присутствием здесь хвойных лесов, обладающих высокими значениями излучательной способности в течение всего года, и по этой причине используемых нами для внешней калибровки СВЧ аппаратуры [2, 4, 6].

Болотистые таежные районы Западной Сибири (62° - 63° СШ) характеризуются высокой обводненностью и наличием участков с разреженным пологом леса. Это проявляется в хорошо различимых на планшетах особенностях весенне-летнего хода РЯТ. В марте, апреле и первой половине мая по существенному снижению РЯТ (до 190 К) на соответствующих участках трансекта четко распознаются периоды таяния снежного покрова и оттаивания почвогрунтов. В летний сезон, когда открыты зеркала озер, почвогрунты насыщены влагой, РЯТ таких участков лежат в интервале 195-210 К.

Сходные годовые профили РЯТ имеют участки трансекта, располагающиеся в пересечении трассой ИСЗ крупных водотоков и больших рек. Сравнивая профили РЯТ для двух таких пересечений, относящихся к дельте Оби и месту впадения в нее Иртыша, нам удалось обнаружить более раннее снижение РЯТ (середина мая в 2006 г., конец апреля - начало мая в 2007 г.) в южной контрольной точке. В северной же подспутниковой точке оно фиксируется только в конце мая - начале июня. По нашему заключению, это связано с различиями в сроках вскрытия рек и схода ледяного покрова. Этот факт хорошо согласуется с закономерностями сезонного хода температуры приземного воздуха в условиях Западносибирской низменности [4].

Степи юга Западносибирской низменности (50° - 52° СШ и 53° - 54.5° СШ) характеризуются глубоким и продолжительным (от 1 до 1.5 месяцев) весенним снижением РЯТ вплоть до значений 162-165 К, что, по нашему выводу, служит индикатором интенсивного таяния снега и насыщения влагой почвогрунтов. Для данной области нам не удалось четко выделить период стабильно мерзлого состояния грунта, так как в зимние месяцы в этих районах имеют место частые оттепели, вызывающие резкое уменьшение РЯТ.

Проведенные исследования показали высокую информативность спутниковой СВЧ информации, полученной в региональном масштабе с использованием радиометра AMSR-E. Предложенная методология формирования планшетов пространственно-временной изменчивости РЯТ позволяет существенно усовершенствовать технологию диагностики состояния ММГ и СМГ, осуществлять типизацию и физико-географическое районирование ландшафтов.

Как показывает анализ, каждая из изученных природных зон, расположенных в Западной Сибири, имеет свой собственный СВЧ «радиопортрет», отличающийся своей характерной особенностью пространственной, сезонной и межгодовой изменчивости РЯТ. При этом для всех широтных зон оказываются четко выраженными периоды максимальной температуры мерзлого состояния грунтов. Наличие водоемов существенно изменяет характер изменчивости РЯТ, затрудняя классификацию подстилающей поверхности суши, в особенности на границах широтных зон. Возможность определения мерзлого/талого состояния почвогрунтов тундровой зоны по изменению значений РЯТ, фиксируемых ИСЗ, подтверждается сопоставлением данных спутникового зондирования с результатами контактных измерений на геокриологическом стационаре Марре-Сале.

Литература

1. Влияние гидрофизических характеристик почв на изменение радиояркостной температуры при промерзании или оттаивании поверхностного слоя / П. П. Бобров, П. В. Жиров, С. В. Кривальцевич, А. С. Яценко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Выпуск 3. Том II. М.: ООО «Азбука-2000», 2006. С. 287–293.
2. Кондратьев, К. Я. Дистанционная индикация акваторий и водосборов / К. Я. Кондратьев, В. В. Мелентьев, В. А. Назаркин. СПб.: Гидрометеопиздат, 1992. 248 с.

3. Мателенок, И. В. Некоторые результаты использования данных спутниковой СВЧ радиометрии для диагностики состояния многолетнемерзлых и сезонно–мерзлых почвогрунтов Евразии / Сборник тезисов международного симпозиума «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД–2011). СПб, 2011.
4. Kondratyev, K. Ya. High latitude climate and remote sensing / K. Ya. Kondratyev, O. M. Johannessen, V. V. Melentyev // John Wiley-Praxis Series in Remote Sensing. Chichester, UK. PRAXIS Publishing Ltd, 1996. 200 p.
5. Mapping freeze/thaw boundaries with SMMR data / B. W. Zuerndorfer, A. W. England, M. C. Dobson, F. T. Ulaby // Agric. For. Meteorol. 1990. Vol. 52. P. 199–225.
6. Melentyev, V. V. Siberian permafrost and seasonally frozen grounds: parameters retrieval using microwave satellite data / V. V. Melentyev, O. M. Johannessen, L. P. Bobylev // Исследование Земли из космоса. 2005. № 5. С. 1–7.
7. Satellite microwave remote sensing of boreal and arctic soil temperatures from AMSR-E / L. A. Jones, J. S. Kimball, K. C. McDonald et al. // Trans. Geosci. Remote Sens. 2007. Vol. 45. No. 7. P. 2004–2018.