

ИЗМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЧВ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЕПРОДУКТАМИ И ЗОЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ ТЭЦ

П.П. Бобров, П.В. Жиров, О.А. Ивченко, С.В. Кривальцевич,
В.Н. Мандрыгина, В.Д. Стасюк

*Омский государственный педагогический университет,
644099, Омск, наб. Тухачевского, 14
E-mail: bobrov@omgpu.omsk.edu*

Приведены результаты исследования влияния загрязнений почв на их диэлектрические характеристики и на динамику радиояркостной температуры на длинах волн 3,6, 5 и 11 см. Установлено, что зольные загрязнения приводят к увеличению доли связанной воды в почвах легкого минералогического состава и почвах с низким содержанием гумуса. Выявлено влияние загрязнений на гидрофизические характеристики почв и на динамику радиояркостной температуры в процессе испарения после значительного увлажнения. Показано, что почвенные участки, загрязненные нефтепродуктами, могут быть выявлены радиометрическим методом по высоким значениям радиояркостной температуры после увлажнения. Использование каналов на разные длины волн позволяет оценивать также толщину загрязненного почвенного слоя. Загрязнение почв зольными выбросами приводит к не столь заметным изменениям и выявление загрязненных участков радиометрическим методом представляется проблематичным.

При микроволновом зондировании почв измеряемые величины (радиояркостная температура в пассивном методе, коэффициент обратного рассеяния – в активном) зависят в значительной степени от диэлектрической проницаемости почв и шероховатости поверхности. Диэлектрическая проницаемость (ДП) влажных почв может варьироваться у разных типов почв как за счет изменения ДП твердой фазы, так и, в большей степени, за счет ДП связанной воды и ее максимально возможного количества в почве. Точное значение ДП связанной воды не известно, однако ее влияние на ДП почв можно достаточно корректно учесть с помощью рефракционной модели [1,2]. Чем больше в почве физической глины (частиц, размером менее 0,01 мм), тем больше удельная поверхность почвы, тем большая часть почвенной влаги может находиться в связанном состоянии. ДП связанной влаги меньше, чем ДП свободной воды (это справедливо как для действительной, так и для мнимой частей комплексной ДП), поэтому увеличение доли связанной воды приводит к уменьшению ДП почвы при больших и средних значениях влажности, когда часть влаги находится в свободном состоянии.

Зола, взятая из фильтра ТЭЦ, имеет гранулометрический состав, близкий к составу легкого суглинка (доля физической глины составляет около 25% по массе), поэтому ее добавление в песчаную почву, где содержание физической глины незначительно, уменьшает диэлектрическую проницаемость практически во всем диапазоне влажностей (рис.1). Видно, что в золе содержится большое количество влаги в связанном состоянии. Диэлько-влажностная зависимость имеет малый наклон, соответствующий связанной воде, вплоть до объемной влажности $0,18 \text{ см}^3/\text{см}^3$. В бедных гумусом суглинистых почвах количество связанной влаги больше, чем в песке, и добавление золы приводит к уменьшению ДП почвы при значениях влажности выше $0,1 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (рис.2), но это изменение заметно лишь при значительной концентрации загрязнений (до 30%). Внесение золы в почву, богатую гумусом, практически не приводит к изменению ДП (рис.3), поскольку высокогумусные почвы имеют большую удельную поверхность и максимальное количество связанной воды соответствует влажности $0,20\text{-}0,22 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Изменение ДП песчаных почв под действием зольных загрязнений исследовано в [3].

Измерения проводились нами в диапазоне частот 0,3-12 ГГц, однако каких-то диапазонных особенностей поведения диэлектрической проницаемости загрязненных почв, кроме тех, что обусловлены дисперсией воды, не наблюдалось. Лишь на самом краю низкочастотного диапазона в почвах, загрязненных золой, наблюдалось возрастание действительной части комплексной ДП при большой влажности. Такое же возрастание наблюдается и в почвах, богатых гумусом. Возможной причиной этого может быть ориентационная поляризация мельчайших коллоидных частиц, обладающих большей массой, чем молекулы воды, и проявляющаяся поэтому только на низких частотах.

Исследование влияния нефтепродуктов (сырой нефти и минерального моторного масла) показало, что диэлектрическая проницаемость почв в этом случае также немного снижается (рис.4). Поскольку нефтепродукты являются гидрофобными жидкостями, изменения количества связанной воды не происходит. Снижение диэлектрической проницаемости почвы в области низких значений влажности является следствием того, что нефтепродукты имеют меньшую ДП (действительная часть - 2-2,5 ед.), чем ДП твердой фазы

почвы (5-7 ед.). Уменьшение диэлектрической проницаемости в области больших значений влажности, возможно, объясняется деполяризующим действием мелких капелек нефтепродуктов в водной эмульсии. Поскольку почвенные поры заполнены не водой, а эмульсией, имеющей меньшую ДП, чем вода, угол наклона диэлько-влажностной зависимости меньше, чем в незагрязненной почве.

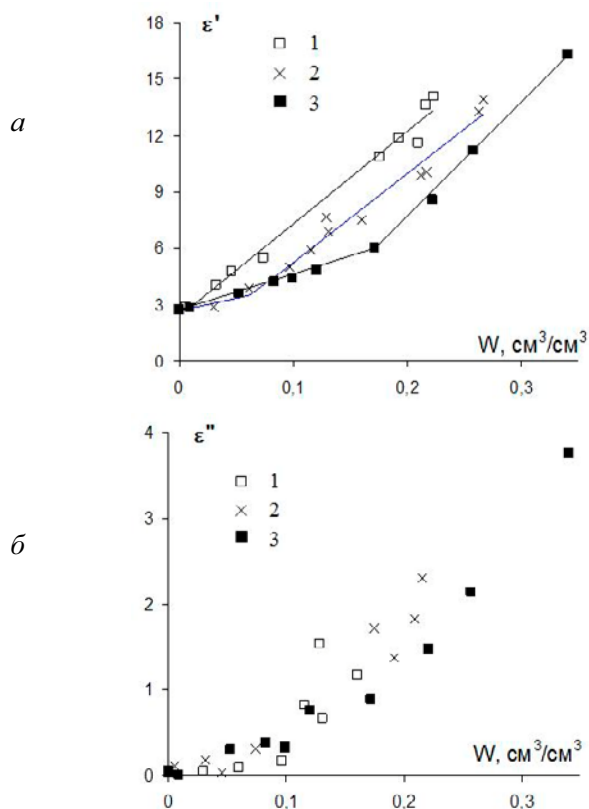


Рис. 1. Экспериментальная зависимость от объемной влажности действительной (а) и мнимой (б) частей КДП песка (1), песка с золой (2) и образца золы (3) на частоте 4,5 ГГц.

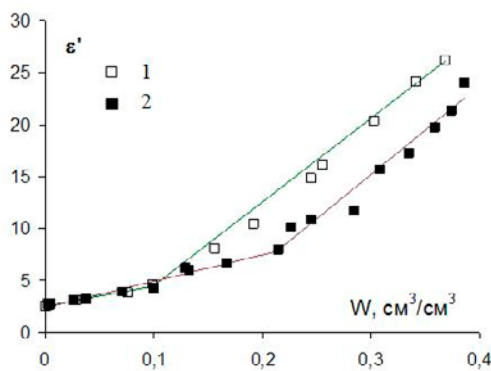


Рис. 2. Экспериментальная зависимость от бъемной влажности действительной части КДП образца с содержанием гумуса 0,6% (1) и этого же образца с содержанием золы в количестве 30% массы (2) на частоте 4,5 ГГц.

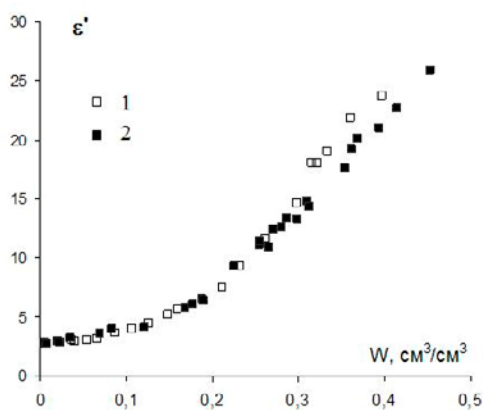


Рис. 3. Зависимость действительной части КДП от объемной влажности образца с содержанием гумуса 6,6% (1) и этого же образца с добавлением золы в количестве 30% массы (2) на частоте 4,5 ГГц.

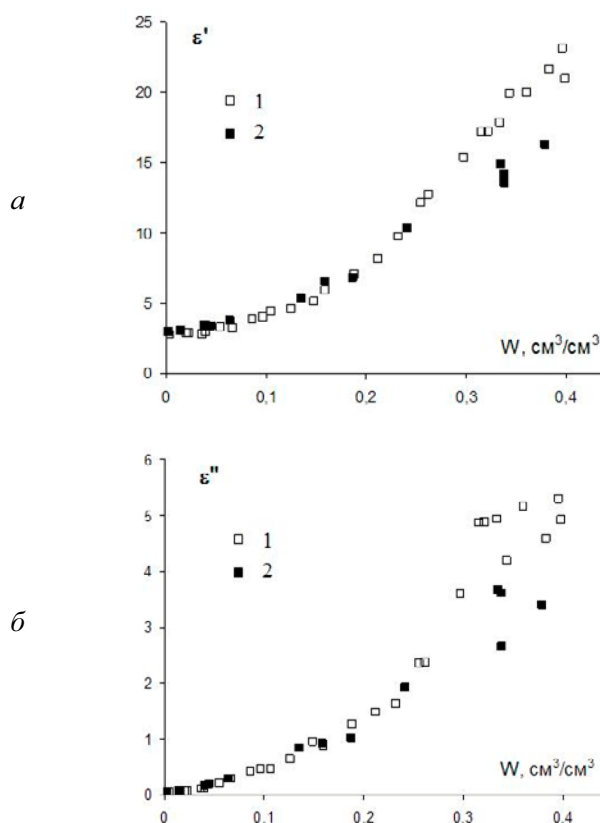


Рис. 4. Экспериментальная зависимость от объемной влажности действительной (а) и мнимой (б) частей КДП образца с содержанием гумуса 6,6% (1) и этого же образца с добавлением минерального моторного масла в количестве 10% массы (2) на частоте 3,4 ГГц.

Измерение радиояркостной температуры производилось на длинах волн 3,6, 5 и 11 см. Антенны радиометров, находящиеся на высоте 2 м над поверхностью почвы, были ориентированы под углом около 10° от надира. Участки загрязненных и чистых (фоновых) почв имели площадь около $2,5 \text{ м}^2$. Для устранения бокового стока воды при поливах по периметру участков на глубину до 70 см была вкопана полиэтиленовая пленка.

В результате исследований установлено, что загрязнители влияют не только на диэлектрическую проницаемость, но и на гидрофизические свойства почв, изменяя почвенную структуру. В частности, изменяется размер почвенных пор и водоудерживающая способность. Это сказывается на испарении почвенной влаги, в процессе которого в поверхностном слое почв устанавливаются разные градиенты влажности в зависимости от типа загрязнителя и его концентрации.

Аналогичным образом на возникающие при испарении градиенты влажности влияет содержание гумуса. Как показано в работе [4], для оценки содержания гумуса необходимо измерять радиояркостную температуру на длинах волн 11 и 3,6 см. При анализе полученных результатов удобно применять нормализованную разность радиояркостных температур

$$NDT = (T_{\text{яА}} - T_{\text{яБ}}) / (T_{\text{яА}} + T_{\text{яБ}}),$$

где $T_{\text{яА}}$, $T_{\text{яБ}}$ – радиояркостные температуры на длинах волн $\lambda_{\text{А}}=11$ см и $\lambda_{\text{Б}}=3,6$ см.

В процессе испарения почвенной влаги устанавливаются отрицательные градиенты влажности (влажность почвы с глубиной возрастает). В этом случае значения NDT отрицательны, так как радиояркостная температура на $\lambda=11$ см ниже из-за большей глубины зондирования, чем на $\lambda=3,6$ см. Чем выше содержание гумуса, тем больше абсолютное значение градиента влажности, тем больше модуль NDT . К сожалению, глубина зондирования на применяемых длинах волн невелика, и заметное различие в градиентах разных почвенных участков вскоре после полива исчезает вследствие быстрого высыхания поверхностного слоя.

Загрязнение осуществлялось путем полива моторным маслом воздушно сухой почвы с шероховатой поверхностью. Несколько экспериментальных циклов полив-испарение проведено при загрязнении участка эквивалентным слоем 2,7 мм, распределенным по поверхности. В результате впитывания масла загрязненным оказался слой почвы толщиной 3-4 см. Поверхностные почвенные агрегаты, загрязненные маслом, перестали впитывать воду и не распались при поливе, поэтому структура шероховатости поверхности в результате полива не изменялась (рис.5.), в отличие от чистой почвы, на поверхности которой значительная часть агрегатов разрушилась, и степень шероховатости снизилась.

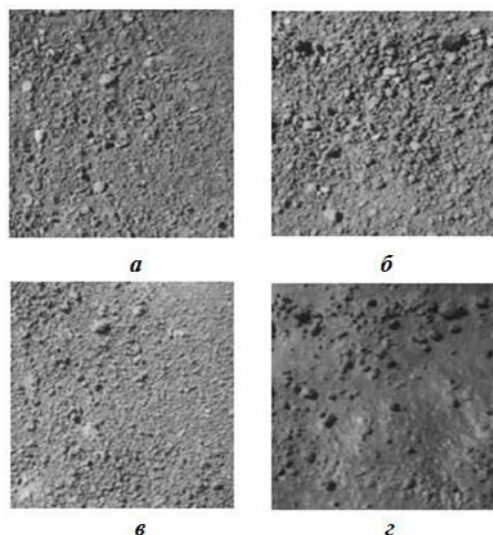


Рис. 5. Изменение шероховатости поверхности загрязненного маслом (а,в) и чистого (б,г) участков почвы с содержанием гумуса 6,6 % после полива (в,г).

Поскольку процесс испарения в ходе экспериментов часто прерывался естественными осадками, измерялась также яркостная температура участка песчаного грунта, который искусственно не поливался, находился в сухом состоянии, поэтому при отсутствии естественных осадков его радиояркостная температура изменялась очень мало (в пределах 280-290 К). Уменьшение радиояркостной температуры этого участка свидетельствует о выпадении естественных осадков.

На рис.6 приведены данные об изменении в процессе испарения радиояркостной температуры участков почвы с высоким содержанием гумуса (6,6%) – чистого и загрязненного маслом после интенсивного орошения. Непосредственно перед орошением яркостные температуры участков имели близкие значения (около 290 К). Песчаный участок имел термодинамическую температуру ниже, чем участки черноземной почвы, вследствие более высокой отражательной способности в оптическом диапазоне и меньшей доли поглощаемой солнечной энергии. Поэтому и радиояркостная температура его была ниже.

Сразу после увлажнения участков слоем воды 20 мм радиояркостная температура чистой почвы на всех длинах волн снизилась до 140-150 мм. Радиояркостная температура загрязненного участка заметно снизилась на длине волны 11 см – до 175 К. На коротких длинах волн это снижение меньше. Такое различие в излучательных характеристиках загрязненного и чистого участков обусловлено двумя обстоятельствами: во-первых, поверхность чистого участка стала более гладкой, во-вторых, она стала более влажной, так как поверхностный слой загрязненной почвы из-за сильных водоотталкивающих свойств увлажнился мало, а большая часть воды впиталась нижележащей незагрязненной почвой. Именно из-за такого неоднородного по глубине увлажнения загрязненной почвы ее радиояркостная температура различна на разных длинах волн. Это различие хорошо проявляется в нормализованной разности *NDT* (рис. 6,з). У чистой почвы сразу после полива значение *NDT* положительно – влажность поверхностного слоя выше, чем влажность нижележащих. У загрязненной почвы значение *NDT* отрицательно и остается таковым в течение всех последующих суток. Такое поведение радиояркостных температур наблюдалось во всех экспериментах, когда почва увлажнялась осадками не менее 10 мм, при этом период существования различий радиояркостных температур чистых и загрязненных участков составляет не менее суток после увлажнения.

Из этого следует, что загрязненные нефтепродуктами почвы отличаются от чистых почв высокими радиояркостными температурами в тех случаях, когда длина волны в вакууме не превышает толщины загрязненного слоя. Это подтверждается данными динамики радиояркостных температур на тех же длинах волн, приведенными на рис.7 для случая большей степени загрязнения (по участку распределен слой масла 4 мм), когда толщина загрязненного слоя составляла 5-6 см. В этом случае увлажнение практически не сказывается не только на $\lambda=3,6$ см, но и на $\lambda=5$ см, а уменьшение радиояркостной температуры на $\lambda=11$ см значительно меньше, чем в предыдущем случае.

Таким образом, проведение измерений на нескольких длинах волн позволяет оценивать также толщину загрязненного слоя, определяя нижнюю границу загрязнения по длине волны радиометрического канала, на котором наблюдается уменьшение радиояркостной температуры после увлажнения.

Использование дополнительного длинноволнового канала, скажем, на $\lambda=21$ см, предположительно позволит увеличить не только глубину зондирования, но и длительность периода, когда имеются различия в радиояркостных температурах, так как позволит оценивать градиенты влажности в более глубоких слоях, влага из которых испаряется медленнее.

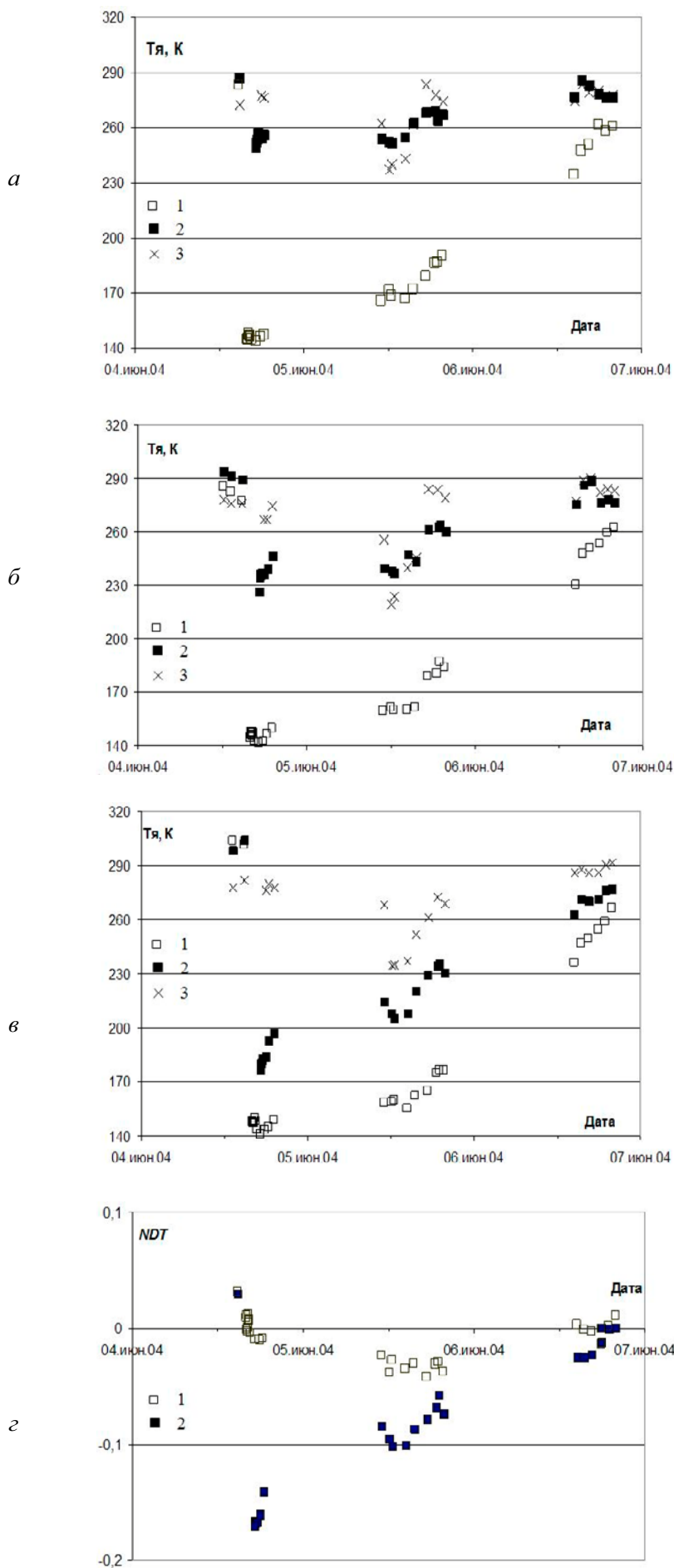


Рис. 6. Динамика радиояростной температуры чистой почвы с содержанием гумуса 6.6 % (1), такой же почвы, загрязненной моторным маслом слоем 2,7 мм, (2) и чистого песка (3) на длинах волн 3,6 см (а), 5 см (б), 11 см (в) и нормализованной разности яростных температур на длинах волн 11 и 3,6 см (г).

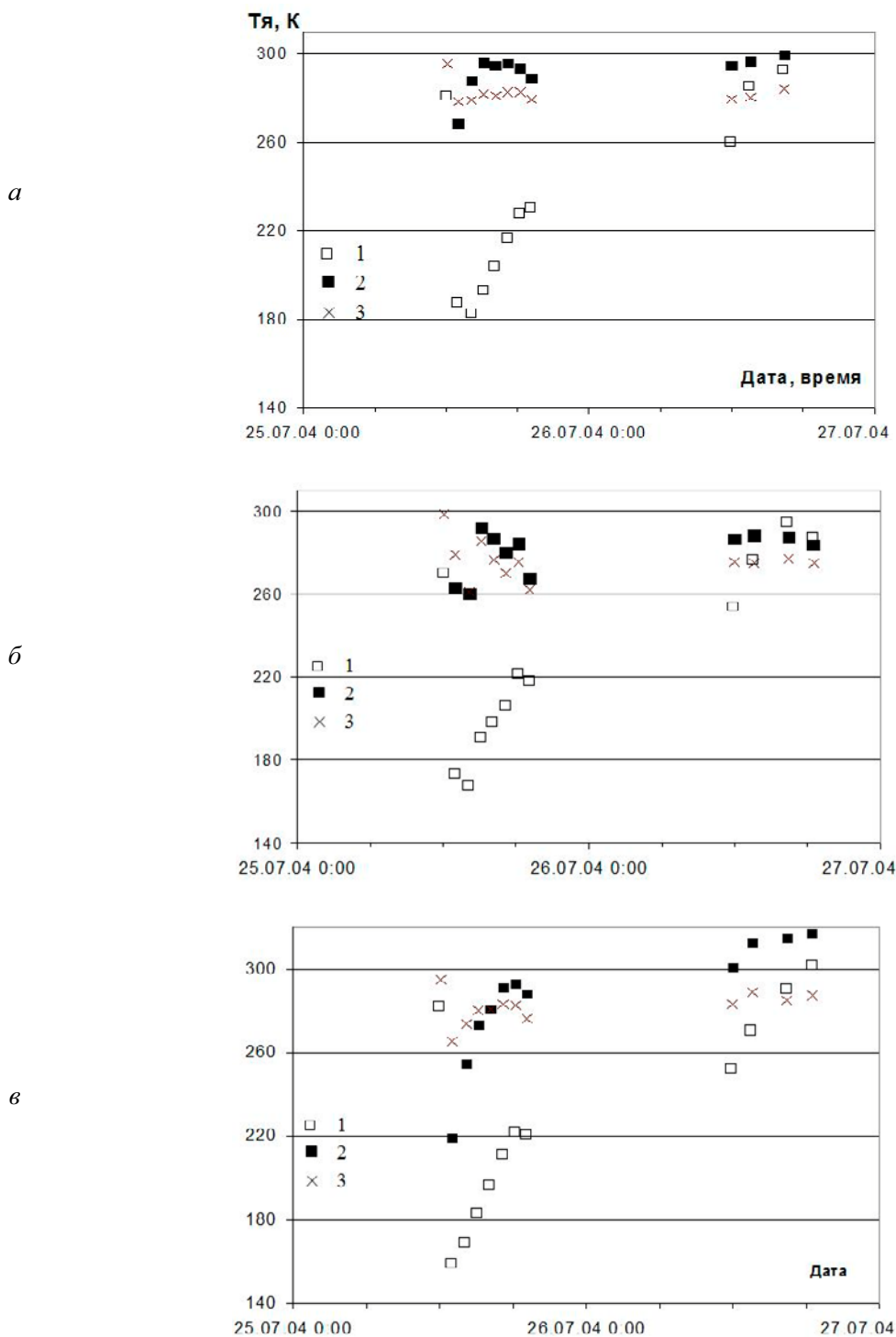


Рис. 7. Динамика радиояростной температуры чистой почвы с содержанием гумуса 6.6 % (1), такой же почвы, загрязненной моторным маслом слоем 4 мм, (2) и чистого песка (3) на длинах волн 3,6 см (а), 5 см (б), 11 см (в).

Почвы, загрязненные зольными выбросами, отличались по радиояростным температурам и значениям *NDT* только после достаточно сильного увлажнения. Так, после выпавших осадков 55 мм различие в *NDT* между загрязненной и чистой почвами было даже выше, чем для почв с различным содержанием гумуса (рис.8, а). При небольших увлажнениях (13 мм) различия между чистой и загрязненной золой почвами незначительно (рис.8, б). Есть также различия в радиояростных температурах, но они также незначительны. Из данных, приведенных на рис. 8, следует, что почвы, загрязненные нефтепродуктами, хорошо выявляются как при больших, так и малых увлажнениях, только при больших увлажнениях период существования различия в радиояростных температурах больше.

Таким образом, установлена возможность эффективного выявления участков почв, загрязненных нефтепродуктами, и оценки толщины загрязненного слоя микроволновым радиометрическим методом. Выявление участков почв, загрязненных зольными выбросами, является проблематичным.

Литература

1. *Комаров С.А., Миронов В.Л.* Микроволновое зондирование почв. Новосибирск: Наука. 2000.
2. *Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П., Галеев О.В., Мандрыгина В.Н.* Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0,1-20 ГГц // Исследование Земли из космоса. 2003. № 5. С. 28-34.
3. *Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П., Ивченко О.А., Кривальцевич С.В., Мандрыгина В.Н.* Влияние гранулометрического состава, гумуса и зольных загрязнений на излучательные и диэлектрические характеристики почв в микроволновом диапазоне. / Совр. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса: Физич. основы, методы и технол. мониторинга окруж. среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст. М.: Полиграф сервис. 2004. С. 333-339.
4. *Бобров П.П., Ивченко О.А., Кривальцевич С.В.* Исследование почвенной структуры методом двухчастотной микроволновой радиометрии. //Исследование Земли из космоса. 2005. № 2. С.82-88.