

А. Н. РОМАНОВ, И. А. СУТОРИХИН

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЕРЕУВЛАЖНЕННЫХ ПОЧВ

Приведены результаты использования дистанционного аэрокосмического зондирования земной поверхности в микроволновом и оптическом диапазонах для картирования гидрологического состояния территории с переувлажненным верхним слоем почвы. Показано, что накопление тяжелых металлов в почве происходит в местах с близким к поверхности залеганием грунтовых вод.

The results of aerospace remote sensing of the terrestrial surface in the microwave and optical bands for mapping the hydrological regime of the territory with overmoistened upper soil layer are presented. It is shown that accumulation of heavy metals in soils occurs in places near the groundwater table.

Для характеристики процессов подтопления и заболачивания часто используют влажность почвы и уровень грунтовых вод (УГВ). Информацию об этих параметрах можно получить, измеряя интенсивность микроволнового излучения почвенного покрова. Важное свойство грунтовых вод — способность их капиллярного подъема в почвенную или грунтовую среду, обуславливающего изменение влажности в слое почвы, находящемся над УГВ и называемом капиллярной каймой [1, 2]. Благодаря большому контрасту диэлектрических свойств сухой и влажной почвы их можно классифицировать по грациям.

Наличие почвенных слоев с разным увлажнением, возникающим за счет капиллярного поднятия над УГВ, способствует уменьшению интенсивности радиотеплового излучения, характеризуемого радиояркостной температурой. Возникающий при этом радиояркостный контраст тем значительнее, чем ближе к поверхности находится увлажненный горизонт и чем больше длина волны регистрируемого излучения.

Физической основой дистанционного определения УГВ является влияние режимов поверхностного увлажнения скин-слоя $l_{\text{Э}}$, вносящего основной вклад в излучение, на радиационно-влажностную зависимость почвенного покрова в зонах фильтрации и подтопления [3]. Устойчивая взаимосвязь между коэффициентом излучения и УГВ в различных почвенно-климатических зонах отличается общими закономерностями и прослеживается до глубин один–три метра [4].

Радиационно-влажностные свойства поверхностного слоя почвы $l_{\text{Э}}$ зависят от режимов увлажнения зоны аэрации грунтовыми водами. При полном насыщении слоя $l_{\text{Э}}$ грунтовыми водами объемная влажность W в этом слое соответствует полной влагоемкости (ПВ) почвы, определяемой как объем почвенных пор (режим подтопления и заболачивания). В этом случае часть слоя $l_{\text{Э}}$ (при $H_{\text{УГВ}} = l_{\text{Э}}$) или весь слой (при $H_{\text{УГВ}} = 0$) оказываются подтопленными грунтовыми водами. При этом коэффициент излучения χ почвенного покрова характеризуется низкими значениями и варьирует в диапазоне от 0,36 (коэффициент излучения воды) до 0,60.

Капиллярное увлажнение скин-слоя наблюдается, когда скин-слой находится выше уровня грунтовых вод и частично увлажняется за счет капиллярной каймы, влажность которой изменяется от максимальной ($W_{\text{max}} = \text{ПВ}$) на поверхности грунтовых вод до минимальной на верхней границе капиллярной каймы ($W_{\text{min}} = \text{НВ}$), соответствующей наименьшей влагоемкости.

Распределение влажности в этой зоне описывает уравнение [4]:

$$W(z) = W_{\text{max}} \cdot \sqrt{1 - \frac{H_{\text{УГВ}} - z}{h_K} (1 - \beta^2)}, \quad (1)$$

где $\beta = W_{\text{min}}/W_{\text{max}} = \text{НВ}/\text{ПВ}$; h_K — предельная высота капиллярного подъема над УГВ. Это соотношение справедливо в интервале глубин $(0 \div H_{\text{УГВ}} - h_K) < z < H_{\text{УГВ}}$.

Выражение (1) приводится к следующему виду [5, 6]:

$$H_{\text{УГВ}} = l_{\text{Э}} + h_K \cdot \frac{W_{\text{max}}^2 - W_{\lambda}^2}{W_{\text{max}}^2 - W_{\text{min}}^2}, \quad (2)$$

где W_{λ} — объемное содержание воды в скин-слое почвы толщиной $l_{\text{Э}}(\lambda)$, определенное по данным радиоизмерений.

Наличие зависимостей $\chi(W)$ на длинах волн λ_1 и λ_2 в сантиметровом и дециметровом диапазонах позволяет построить зависимость $\chi(H_{\text{УГВ}})$ с использованием выражения (2), устанавливающего

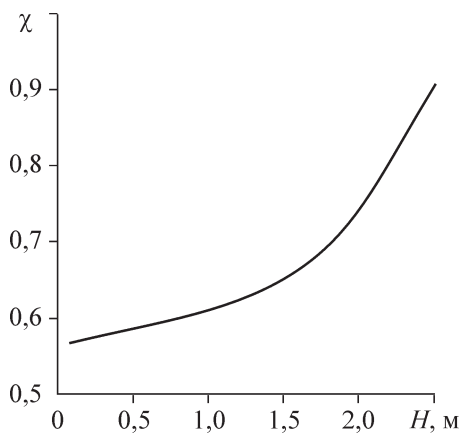


Рис. 1. Зависимость коэффициента излучения почвенного покрова от глубины залегания грунтовых вод, рассчитанная по формуле (2) для среднесуглинистых черноземных почв равнинной части Алтайского края.

связь между глубиной залегания грунтовых вод и влажностью почвы в слоях l_{λ_1} и l_{λ_2} . Значения W , входящие в эти выражения, можно определить по данным дистанционных измерений $\chi(\lambda_1)$ и $\chi(\lambda_2)$. При этом полагаем, что $W(\lambda_1) \sim W_{\min}$.

Зависимость $\chi(H_{\text{УГВ}})$ (рис. 1) рассчитана по формуле (2) для среднесуглинистых почв Алтайского края с высотой капиллярного поднятия 2,5 м и $\text{ПВ} = 0,45$. Эта зависимость локальна, но, изменив параметры, входящие в (2), можно установить подобные зависимости для других почв.

Величины ПВ , НВ , h_K , входящие в выражение (2), являются константами для почвы данного типа и гранулометрического состава. Величина h_K , оказывающая влияние на режимы увлажнения, зависит от размера пустот, структуры порового пространства и изменяется от нескольких сантиметров (для песков) до нескольких метров (для глин).

В полевых условиях h_K определяется по распределению влажности от поверхности до УГВ, в лабораторных — методом монолитов и с помощью капилляриметров. Если h_K выходит на поверхность почвы, W_{\min} отличается от НВ и может быть определена по данным дистанционных измерений χ .

При отсутствии капиллярного насыщения реализуется режим, для которого выполняется условие $l_{\text{э}} < H_{\text{УГВ}} - h_K$. Влажность почвы в этой зоне не зависит от УГВ, а определяется осадками, орошением и испарением с почвы.

Территория, выбранная для дистанционного картирования УГВ, находилась вблизи промышленного отстойника Алтайского горно-обогатительного комбината, расположенного на окраине пос. Горняк Локтевского района Алтайского края. Отстойник представляет собой водоем с длиной береговой линии 3,8 км. Фильтрационные свойства осевшей пульпы, заполняющей большую часть отстойника, сравнимы с таковыми мелкозернистого песка с коэффициентом фильтрации $K = 1,5$ м/сут и пористостью $P = 0,45$. Борты отстойника сложены продуктами шахтной выработки (щебень с мелкозернистым наполнителем), для которых $K = 5-10$ м/сут, $P = 0,5$. Подстилающие породы — глины ($K = 0,01$ м/сут, $P = 0,5$), мощность пласта 5–6 м. Поверхностный слой толщиной 0,2–0,3 м представляет собой супесь ($K = 0,1-0,5$ м/сут, $P = 0,5$). Уровень воды в отстойнике по данным наблюдений практически одинаков и составляет 0,3–0,5 м.

Промышленный отстойник, связанный с технологией обогащения руды, оказывает значительную антропогенную нагрузку на прилегающие территории и пос. Горняк. Его влияние на экологическое состояние почв в значительной степени проявляется через фильтрационные процессы, приводящие к утечке в почву воды, содержащей вредные примеси. Гидрологическая обстановка характеризуется заболачиванием окрестных земель и аномально высоким УГВ.

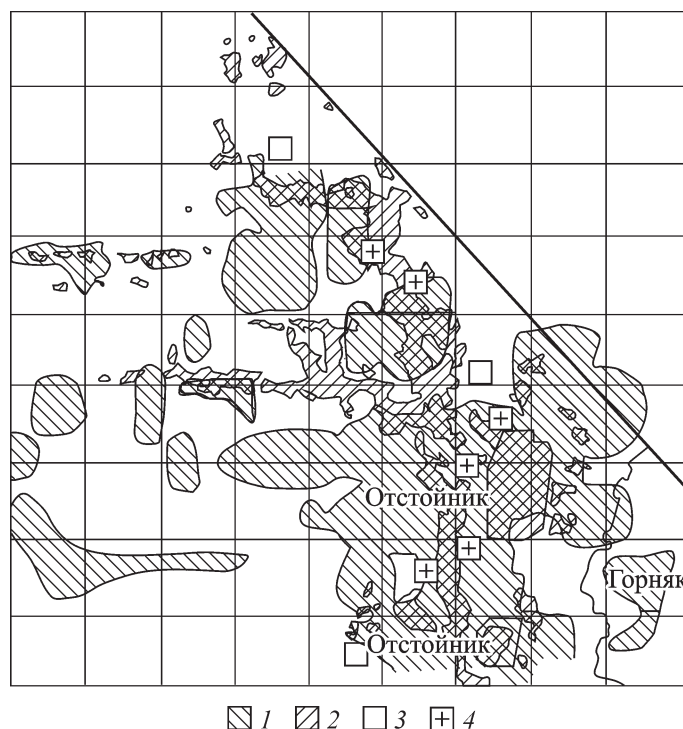


Рис. 2. Карта-схема распределения глубины залегания грунтовых вод вблизи промышленного отстойника.

1 — участки с УГВ < 1 м (по данным самолетной микроволновой съемки); 2 — области повышенной влажности поверхностного слоя почвы (по данным орбитальной сканерной съемки); скважины: 3 — с УГВ > 1 м, 4 — с УГВ < 1 м.

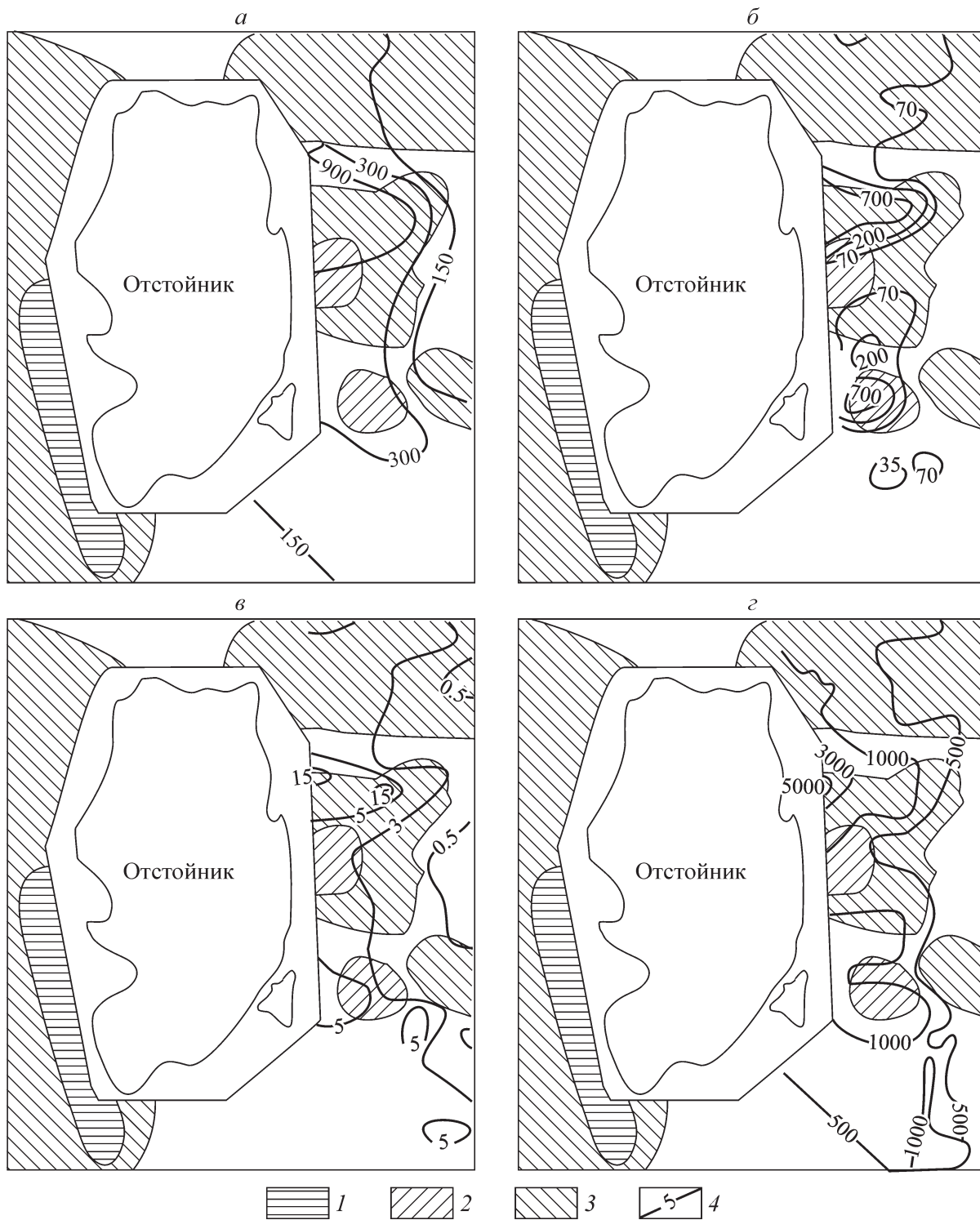


Рис. 3. Карты-схемы распределения уровня грунтовых вод и областей повышенного содержания микро-элементов вблизи отстойника.

Высота УГВ, м: 1 – 0; 2 – <math>< 1</math>; 3 – <math>< 1,5</math>. 4 – содержание микроэлементов в почве (а – меди, б – мышьяка, в – кадмия, г – цинка), мг/кг.

Естественное питание грунтовых вод происходит за счет атмосферных осадков в осенне-весенний период и перетекания влаги из нижележащих горизонтов. Под влиянием отстойника, расположенного на возвышении и играющего роль своеобразного водонапора, оно нарушается. За счет фильтрации воды из отстойника значительная территория вокруг него заболочена и подтоплена.

В результате аэрокосмического картирования УГВ на территории шириной 4–6 км, прилегающей к промышленному отстойнику, установлено, что фильтрационные процессы наблюдаются по всему периметру отстойника. По данным дистанционного зондирования созданы карты-схемы распределения областей с переувлажненным поверхностным слоем почвы и близким залеганием грунтовых вод, рассчитаны значения W и $H_{УГВ}$.

Облет исследуемой территории на самолете по запланированным галсам длиной 4–6 км перпендикулярно отстойнику позволил определить поперечные размеры зоны фильтрации. Расстояние между галсами выбиралось с таким расчетом, чтобы охватить всю территорию зоны фильтрации. Однако, как выяснилось, по одним трассовым измерениям трудно воссоздать двухмерную картину. Для решения этой задачи необходимо совместное использование самолетной микроволновой съемки и орбитальной сканерной спектрофотометрической в оптическом диапазоне.

Для предварительной оценки гидрологической обстановки использовались орбитальные снимки, сделанные сканером МСУ-3 с космического аппарата «Космос-1939». Самолетная микроволновая съемка применялась для определения почвенной влажности и УГВ. Синхронно в реперных точках велись наземные измерения W и УГВ. Значения УГВ, полученные по данным трассовой микроволновой съемки, совмещались с картой-основой и космическим сканерным изображением. В результате тематической обработки данных дистанционной микроволновой съемки на компьютере получены карты-схемы участков с близким залеганием УГВ (см. рис. 2). По данным самолетной микроволновой съемки выделены также точки, где глубина залегания грунтовых вод измерялась контактным способом.

Сопоставление результатов аэрокосмического зондирования и наземных измерений УГВ с данными геохимического обследования прилегающих к отстойнику почв, осуществленного Ассоциацией «Геоэкология», показало, что области повышенной концентрации в почве многих тяжелых элементов приурочены к территориям, где глубина залегания грунтовых вод составляет менее одного метра. Следовательно, часть химических элементов из отстойника может разноситься грунтовым потоком и аккумулироваться в местах выклинивания грунтовых вод в поверхностный слой почвы. Нами приведены примеры распределения УГВ и областей повышенного содержания некоторых тяжелых элементов вблизи отстойника (см. рис. 3).

Проведенные исследования свидетельствуют об эффективности применения дистанционных аэрокосмических методов при контроле и анализе экологической ситуации на сравнительно больших территориях. Сочетание этих методов с полигонными исследованиями позволяет планировать наземные эксперименты по локальному отбору проб. По данным химического анализа, после их компьютерной обработки, осуществляется тематическое картирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Побережский Л. Н.** Водный баланс зоны аэрации в условиях орошения. — Л.: Гидрометеиздат, 1977.
2. **Скрипчинская Л. В., Янголь А. М., Гончаров С. М., Коробченко С. М.** Сельскохозяйственные гидротехнические мелиорации. — Киев: Вища шк., 1977.
3. **Шутко А. М.** СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. — М.: Наука, 1986.
4. **Голованов А. И., Паласиос О.** Об определении зависимости запасов почвенной влаги от глубины промерзания грунтовых вод // Почвоведение. — 1968. — № 1.
5. **Комаров С. А., Миронов В. Л., Романов А. Н.** Дистанционное определение уровней грунтовых вод с использованием региональных баз данных // Исследования Земли из космоса. — 1993. — № 4.
6. **Романов А. Н.** Некоторые методы интерпретации данных дистанционного зондирования почвенного покрова в СВЧ-диапазоне: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Барнаул, 1994.

*Институт водных и экологических проблем
СО РАН, Барнаул*

*Поступила в редакцию
22 сентября 2004 г.*