

НАЦІОНАЛЬНЕ
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Журнал засновано в лютому 1995 р. ♦ Виходить 6 разів за рік

КИЇВ

Том 6, № 5/6, 2000

KYIV

ЗМІСТ

П'ЯТЬ РОКІВ ЖУРНАЛУ «КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ»

Солодовник Л. Л. Мас-спектрометричні дослідження верхньої атмосфери і молекулярного оточення космічних апаратів бортовими приладами СКТЬ ФТІНТ НАН України

Ефимов В. Б., Калмыков И. А., Краснов О. А., Курекін А. С., Цымбал В. Н., Комяк В. А., Яцевич С. Е. Применение радиолокации Земли из космоса в гидрометеорологии

Киров Б., Георгиева К., Данов Д., Банков Л., Василева А. Воздействие солнечной вспышки на ионосферы Венеры и Земли по данным спутников «Пионер-Венера» и «Dynamics Explorer-B»

CONTENTS

3 FIVE YEARS OF JOURNAL «SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY»

8 *Solodovnik L. L.* Mass spectrometry of the upper atmosphere and molecular surrounding of spacecraft by on-board SRDB ILTPh&E instruments

16 *Efimov V. B., Kalmykov I. A., Krasnov O. A., Kurekin A. S., Tsybal V. N., V. A. Komyak, and Yatsevich S. Ye.* Radar remote sensing of the Earth from space in hydrometeorology

29 *Kirov B., Georgieva K., Danov D., Bankov L., Vassileva A.* Effect of solar flares on the ionospheres of Venus and the Earth from the Pioneer Venus and Dynamics Explorer-B data

<i>Баранец Н. В., Афонин В. В., Гладышев В. А., Соболев Я. П., Комраков Г. П.</i> Модификация ионосферной плазмы в ближнем ВЧ-поле дипольной антенны: активный эксперимент в космосе	35	<i>Baranets N. V., Afonin V. V., Gladyshev V. A., Sobolev Ya. P., Komrakov G. P.</i> Modification of ionospheric plasma in the near RF field of a dipole antenna: Active experiment in space
<i>Баранец Н. В., Ружин Ю. Я., Афонин В. В., Ораевский В. Н., Пулинец С. А., Докукин В. С., Михайлов Ю. М., Соболев Я. П., Жузгов Л. Н., Прутенский И. С.</i> Квазипоперечная к геомагнитному полю инжекция электронных пучков до данным спутника «Интеркосмос-25»: проект АПЭКС	49	<i>Baranets N. V., Ruzhin Yu. Ya., Afonin V. V., Oraevsky V. N., Pulinets S. A., Dokoukin V. S., Mikhailov Yu. M., Sobolev Ya. P., Zhuzgov L. N., Prutensky I. S.</i> Electron beam injection quasilateral to the geomagnetic field from the data of Intercosmos-25 satellite: APEX project
НАШИ АВТОРИ	63	OUR AUTHORS
АВТОРСЬКИЙ ПОКАЖЧИК (тт. 1—6, 1995—2000 pp.)	66	AUTHOR INDEX (Volumes 1—6, 1995—2000)
ПОВНИЙ ЗМІСТ тт. 1—6 за 1995—2000 pp.	87	TABLE OF CONTENTS (Volumes 1—6, 1995—2000)
НОВИНИ КОСМІЧНИХ АГЕНТСТВ СВІТУ	105	NEWS FROM SPACE AGENCIES

УДК 551.501.81

Применение радиолокации Земли из космоса в гидрометеорологии

В. Б. Ефимов¹, И. А. Калмыков¹, О. А. Краснов¹,
А. С. Курекин¹, В. Н. Цымбал¹, В. А. Комяк², С. Е. Яцевич²

¹Центр радіофізичного зондування Землі НАН і НКА України, Харків

²Інститут радіофізики і електроніки НАН України, Харків

Надійшла до редакції 12.07.99

Подано узагальнений досвід роботи з визначення кількісних характеристик гідрометеорологічних явищ у системі атмосфера—океан—суша за радіолокаційними даними ШСЗ типу «Космос-1500», «Океан», «Січ-1».

Периодически регионы Земли подвергаются влиянию стихийных бедствий, таких как ураганы, наводнения, снежные заносы, сильные ливни, пыльные бури и др. Учитывая урон, наносимый различным отраслям народного хозяйства, а также возможные человеческие жертвы, необходима оперативная информация о состоянии атмосферы, рек, внутренних водоемов и морей для составления долгосрочных метеорологических прогнозов.

Оперативная информация о грозах, шквалах, зонах сильных осадков, снежных зарядов, пыльных бурь необходима для управления движением самолетов. Флоту различного назначения необходима информация о ветрах, штормах, морских течениях, вероятности встречи со льдом. Большое значение гидрологическая информация имеет для сельского хозяйства, где знание прогнозов позволяет уточнять сроки сева и уборки, целесообразность и период внесения удобрений, проведения мелиоративных работ [7].

Снежный покров оказывает существенное влияние на жизнедеятельность человека, поскольку его наличие определяет, прежде всего, энергетический и водный баланс поверхности Земли.

Интенсивность весеннего половодья во многом определяется скоростью таяния снега. Талые воды переполняют водоемы и болота, восполняют запасы грунтовых вод, увлажняют почву, создавая запасы влаги, величина которых имеет большое значение для будущего урожая. При этом, наряду с пользой от увеличения водных запасов, имеют место потери времени и материальных ресурсов, связанные с необходимостью расчистки от снега дренажных систем и с последствиями затопления вовлеченных в хозяйственную деятельность территорий.

В период нахождения Украины в составе СССР и в постсоветский период получила большое развитие сеть гидрометеорологических станций, постов, обсерваторий, на которых проводятся круглосуточные измерения по сложной программе. Однако и сейчас сеть станций недостаточна для описания полной картины гидрометеорологических условий в регионах.

В последнее время широкое распространение получили дистанционные методы зондирования атмосферы Земли и ее поверхности с привлечением радиолокаторов бокового обзора (РБО). Особый интерес в составлении гидрологических и метеорологических прогнозов представляет радиолокацион-

ная информация, получаемая в 3-см диапазоне радиоволн с метеорологических спутников типа «Сич-1», «Океан» [1]. Методы обработки данных радиолокационного зондирования основаны на установленных закономерностях рассеяния радиоволн объектами природной среды Земли [9], при этом используются количественные оценки характеристик рассеянных радиосигналов и интерактивный анализ радиолокационных изображений с привлечением сопутствующей информации.

В спектре задач, решаемых спутниковыми РБО для целей гидрометеорологии, можно выделить следующие.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЯ ПРИВОДНОГО ВЕТРА

При взаимодействии ветра с водной поверхностью происходит передача энергии атмосфере океана.

Энергия ветра является одним из главных факторов, порождающих основные системы течений океана. Определив абсолютные значения скоростей и направлений приводных ветров, вызванных различными метеообразованиями (от самых слабых до наиболее опасных — тропических циклонов), можно оценить их энергетику, влияние на структуру деятельного слоя океана и многое другое.

Необходимо подчеркнуть, что методика определения параметров поля приводного ветра по космической радиолокационной информации прошла всестороннюю апробацию в учреждениях Госкомгидромета и Управления гидрографии ВМФ бывшего СССР, на основании которой были выпущены нормативно-производственные методические указания [4].

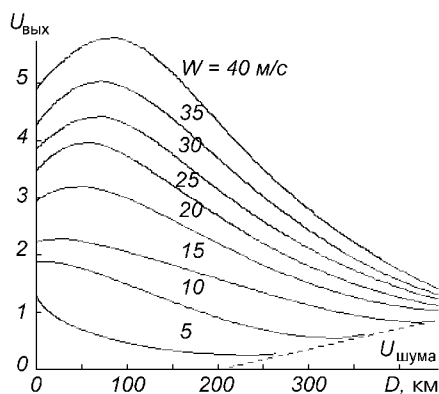


Рис. 1. Зависимости уровней сигналов в полосе обзора РБО «Сич-1» для различных состояний морской поверхности

Определение параметров поля приводного ветра над морской поверхностью по радиолокационным данным базируется на зависимости уровня рассеянного сигнала от скорости ветра и ориентации его вектора относительно направления зондирования. Высокая чувствительность спектральной плотности морской ряби, рассеивающей радиоволны сантиметрового диапазона, а следовательно, интенсивности рассеянного сигнала к изменениям вектора скорости приводного ветра, позволяет наблюдать даже слабые его вариации, что значительно облегчает установление направления ветра.

Для предварительной оценки состояния поля приводного ветра производится оперативный анализ космических радиоизображений, направленный на быстрое исследование структуры поля волнения, обнаружение различных неоднородностей и идентификацию их непосредственно по радиоизображению на экране дисплея или твердой копии. При визуальном анализе выделяются зоны повышенной яркости, обусловленные увеличением спектральной плотности ряби под воздействием приводного ветра и зоны понижения яркости, определяются их форма и направление. По структуре этих зон устанавливается тип атмосферного образования вызвавшего приводный ветер (атмосферный фронт, циклон, мезомасштабные конвективные ячейки и др.).

При исследовании тонкой структуры космических радиолокационных изображений морской поверхности в полосе обзора до 500 км часто можно определить направление приводного ветра с помощью различных косвенных признаков — трассиров. Направление ветра оценивается по косвенным признакам и структурным особенностям в пространственном распределении яркости на радиолокационном изображении. Такими признаками являются: радиолокационные тени за возвышенными участками побережья и за островами, связанные с экранированием части набегающего воздушного потока; характер и организация отдельных ячеек в поле пространственно упорядоченной мезомасштабной конвекции; периодические структуры, вызванные орографическими подветренными волнами; протяженные полосчатые структуры, вытянутые параллельно направлению вектора приводного ветра, ориентация зон схождения ветровых потоков и многое другое.

Для определения характера атмосферного образования и направления ветра целесообразно привлекать оптическую информацию (если это возможно), получаемую на ИСЗ «Сич-1» синхронно с радиолокационной, а также данные контактных наземных измерений.

При оперативном анализе радиолокационных

изображений (РЛИ) основным этапом является оценка интенсивности рассеянных сигналов, которая производится сопоставлением по яркости участков рабочего поля радиоизображения с градационными уровнями радиолокационной калибровки. По найденным значениям уровней рассеянных сигналов и направлениям ветра при помощи расчетных зависимостей (на рис. 1 представлены расчетные

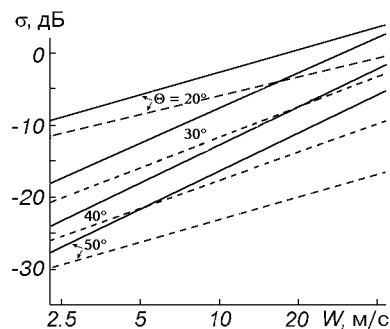


Рис. 2. Обобщенные зависимости удельной ЭПР σ° морской поверхности от скорости приводного ветра W для $\lambda = 3$ см для вертикальной поляризации при облучении поверхности навстречу ветру (сплошные линии) и ортогонально к нему (штриховые линии) для различных углов падения Θ

зависимости уровней сигналов в полосе обзора РБО «Сич-1» при различных состояниях морской поверхности; зависимости построены для наиболее часто используемого режима работы РБО) определяется модуль скорости приводного ветра. Следует подчеркнуть, что данные рис. 1 получены для случая направления зондирования поверхности навстречу ветру, поэтому для получения данных при произвольном направлении зондирования необходимо учесть азимутальную зависимость интенсивности рассеянных сигналов от направлений приводного ветра [4].

Для получения более точных оценок параметров приводного ветра используются обобщенные зависимости удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) поверхности океана σ° от скорости приводного ветра $|W|$ для различных углов падения Θ (рис. 2). Эти зависимости получены путем расчетов на базе модели избирательного рассеяния радиоволн взволнованной морской поверхностью [14] и коррекции результатов расчетов по данным многолетних экспериментов [3], проведенных с борта вертолета и самолета-лаборатории.

На рис. 3, а приведено радиолокационное изображение поверхности Тихого океана возле южного

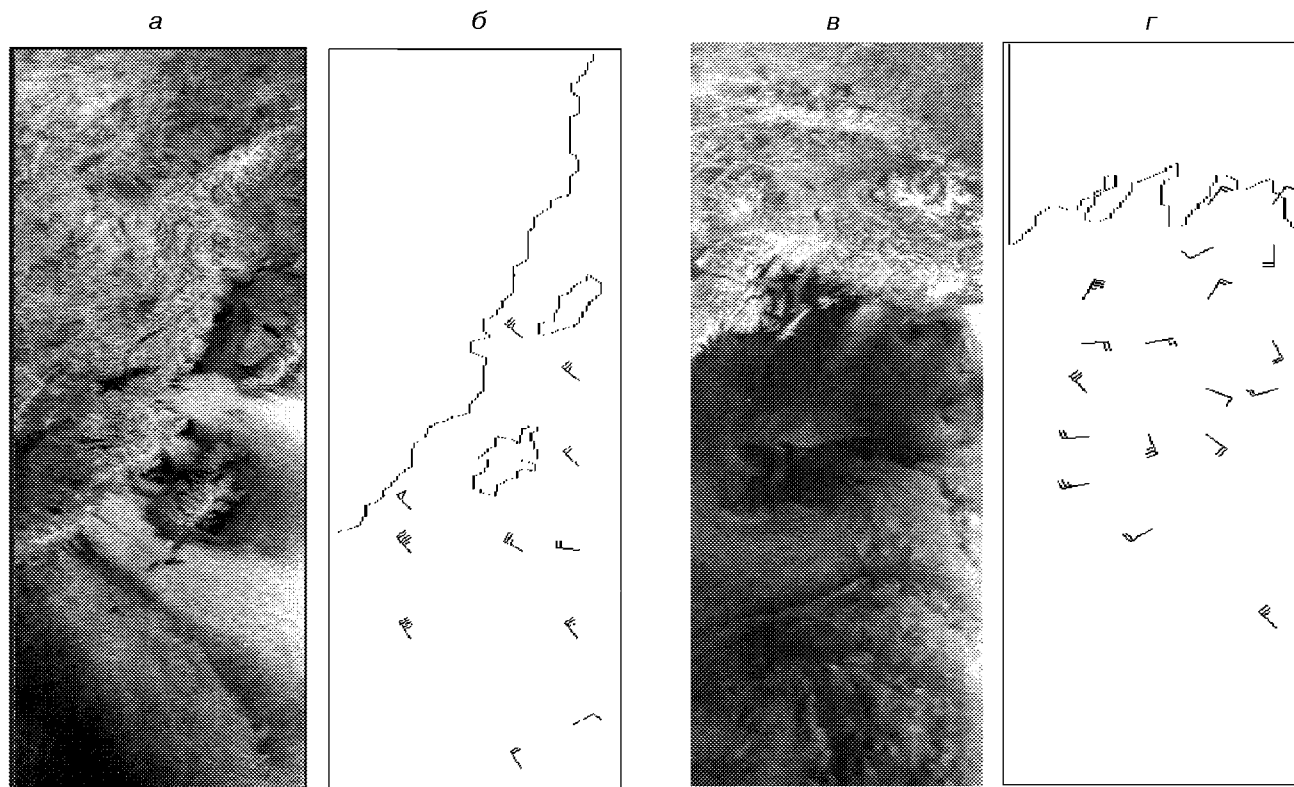


Рис. 3. Радиолокационное изображение участка Тихого океана (залив Аляска), полученное РБО ИСЗ «Сич-1» 10.01.96 г. (а) и 12.01.96 г. (б), и соответствующие карты поля приводного ветра, полученные в результате обработки радиолокационной информации (в, г)

побережья Аляски, полученное РБО ИСЗ «Сич-1» 10.01.96 г. На радиолокационном изображении отчетливо проявляются «отпечатки» мощных потоков приводного ветра: двух потоков южнее о-ва Кадьяк и одного — севернее. Генеральное направление ветровых потоков у морской поверхности по радиоизображению определяется однозначно — с СЗ на ЮВ, об этом свидетельствуют как ориентация самих потоков воздушных масс, так и ориентация зон затенения у побережья и островов. При обработке изображения такого типа пространственное усреднение радиолокационных данных, необходимое для повышения точности определения σ° поверхности, может быть выполнено по достаточно большим участкам около $50 \times 50 \text{ км}^2$.

На рис. 3, б представлена карта приводного ветра, построенная при обработке изображения 3, а на ЭВМ. Видно, что скорость ветра в потоках достигает 20 м/с. Особую ценность радиолокационных данных составляет возможность точного определения положения границ ветровых потоков, т. е. зон наиболее опасных для мореплавания (ветер здесь резко изменяется на небольших расстояниях порядка 1—2 км), которое невозможно провести при помощи других средств дистанционного зондирования и контактных измерений.

Несколько иная ветровая атмосферная ситуация представлена на радиолокационном изображении этого же района (рис. 3, в), полученном 12.01.96 г. Атмосферные процессы в этом районе характеризуются интенсивной мезомасштабной конвекцией, более устойчивой в южной части. В северной части изображения океанской поверхности (на периферии поля мезомасштабной конвекции) наблюдаются процессы развития атмосферной неустойчивости — генерация целого ряда мезомасштабных вихрей. В этих условиях направление приводного ветра резко изменяется на относительно небольших расстояниях. В поле мезомасштабных конвективных ячеек изменение направления ветра происходит столь часто, что это практически невозможно отобразить в карте поля приводного ветра. Для этого случая можно оценить направление генерального перемещения воздушной массы (для стабильного поля мезомасштабной конвекции), а также диапазон изменения скорости приводного ветра. В нижней части снимка изменение скорости приводного ветра составляет 10—15 м/с. Направление и скорость приводного ветра для остальной части изображения приведены на рис. 3, г.

Анализ большого количества радиолокационных изображений взволнованной морской поверхности позволяет сделать заключение о возможности наблюдения зарождения и развития самых различных

атмосферных процессов, в том числе и наиболее динамичных и грозных — тропических и внетропических циклонов. Действительно, РБО позволяют контролировать развитие атмосферных вихрей как в самом начале их зарождения (при скоростях приводного ветра 5—10 м/с), так и в развитом состоянии, когда скорость ветра в тропических циклонах достигает 50 м/с и более [13].

ДИАГНОСТИКА МОРСКИХ ЛЬДОВ КОСМИЧЕСКИМИ РБО

Обширные площади полярных морей, океанов, а также внутренних водоемов могут быть покрыты слоем льда различной толщины. Нарастание, дрейф и разрушение ледяного покрова связаны с динамическими и термодинамическими процессами в атмосфере и океане. В свою очередь, лед оказывает существенное влияние на тепловой баланс Земли, что должно учитываться при глобальных и региональных метеорологических и гидрологических прогнозах, климатических исследованиях и т. д. [5].

В отличие от морской поверхности, представляющей собой однородную в диэлектрическом смысле среду, характеристики рассеяния которой определяются только состоянием (статистическими свойствами) поверхности, лед представляет собой чрезвычайно сложную систему. Диэлектрические свойства льда определяются условиями образования, температурой, соленостью, возрастом (толщиной) и заметно изменяются во времени. Многообразие физических свойств и трудности, возникающие при решении задач рассеяния радиоволн ледяными покровами, не позволяют создать единую модель, адекватно описывающую процессы рассеяния, поэтому основу методов интерпретации результатов зондирования льдов составляют обобщенные экспериментальные данные.

На рис. 4 приведены результаты измерений $\sigma^\circ(\Theta)$ морских льдов различного возраста в осенне-зимний период года, построенные на основе банка данных радиолокационных отражений, созданном в ИРЭ НАНУ и ЦРЗЗ НАНУ и НККАУ. Представленные зависимости охватывают основные виды дрейфующих льдов в Арктическом бассейне в соответствии с международной классификацией морских ледовых карт [8].

Обобщенная экспериментальная зависимость удельной ЭПР от возраста льда представлена на рис. 5. Приведенная зависимость в общем виде характеризует изменение УЭПР с возрастом морского льда и составляет основу методов интерпре-

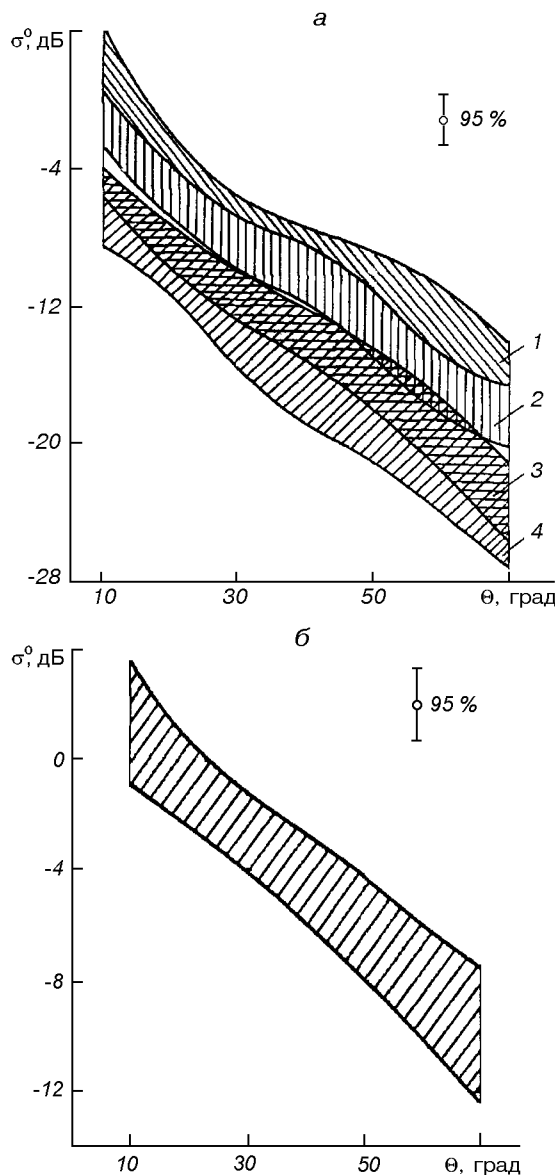


Рис. 4. Угловая зависимость удельной ЭПР: *a* — для льдов осеннего и зимнего происхождения (1 — нилас, 2 — молодой лед, 3 — тонкий однолетний лед, 4 — толстый однолетний лед); *б* — для многолетних льдов

тации космической радиолокационной ледовой информации [2].

Наряду с этим, при интерпретации данных РЛ-зондирования широко применяются методы качественного анализа РЛИ, основанные на сравнении получаемых радиоизображений с эталонными, характерными для конкретного типа ледяного покрова [10].

Следует отметить, что обобщенные данные (рис. 5), как и приведенные в [10] дешифровочные

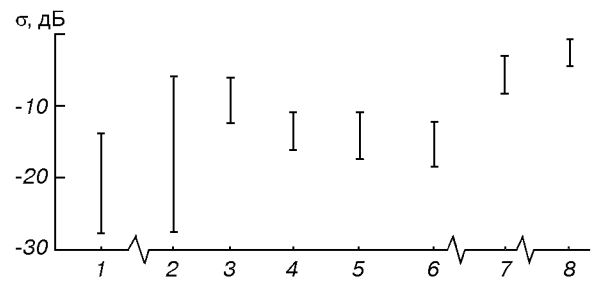


Рис. 5. Обобщенная зависимость удельной ЭПР морского льда от возраста (толщины) для $\theta \approx 40^\circ$: 1 — море, скорость ветра 0—10 м/с, 2 — нилас ($h < 10$ см), 3 — молодой лед ($h = 10-30$ см), 4 — тонкий однолетний лед ($h = 30-70$ см), 5 — средний однолетний лед ($h = 70-120$ см), 6 — толстый однолетний лед ($h > 120$ см), 7 — многолетний лед ($h > 200$ см), 8 — шельфовые ледники

признаки, не охватывают всего многообразия ситуаций, возникающих при наблюдениях в натуральных условиях, поэтому при интерпретации радиолокационных изображений необходимо привлекать дополнительную информацию (данные о гидрометеорологическом режиме в районе наблюдений, сопутствующую метеорологическую информацию и т. д.) [2, 10].

Значительный научный и практический интерес представляют исследования пространственного распределения толщины морского льда в зимний период года. Как показано выше, связь УЭПР морского льда с его возрастом (толщиной) может быть использована для решения этих задач радиолокационной аппаратурой космического базирования. На рис. 6 приведен монтаж РЛИ Аляски и прилегающих районов Северного Ледовитого океана. РЛИ охватывает обширный район ледяного покрова различного возраста. На РЛИ возможно выделение участков с морскими льдами, отличающихся яркостью, а следовательно, и УЭПР. Основываясь на обобщенных связях УЭПР морского льда с его возрастом и принимая во внимание особенности гидрометеорологического режима в рассматриваемом районе, можно выделить зоны распространения многолетнего льда, однолетнего припая, зоны торосистого однолетнего припая, заприпайной полыньи.

Регулярные наблюдения ледовой обстановки позволяют определять скорости дрейфа различных участков ледяных полей и образований. Эта информация может быть использована для непрерывного построения карт течений и дрейфа льдов, что является важным для изучения полярных районов.

Результаты РЛ-съемки космическими РБО могут быть использованы и для наблюдения процессов

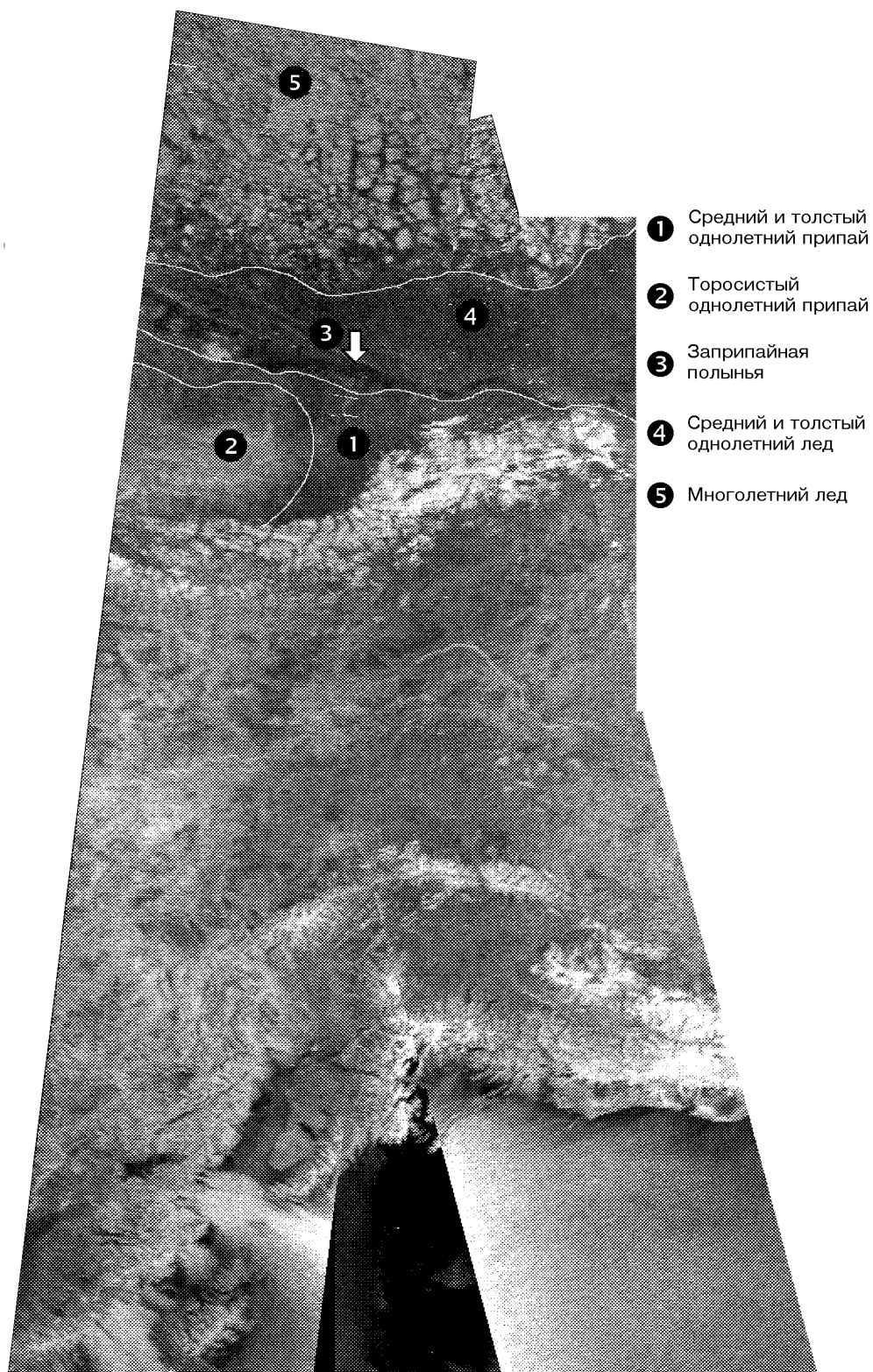


Рис. 6. Монтаж РЛИ Аляски ИСЗ «Сич-1»

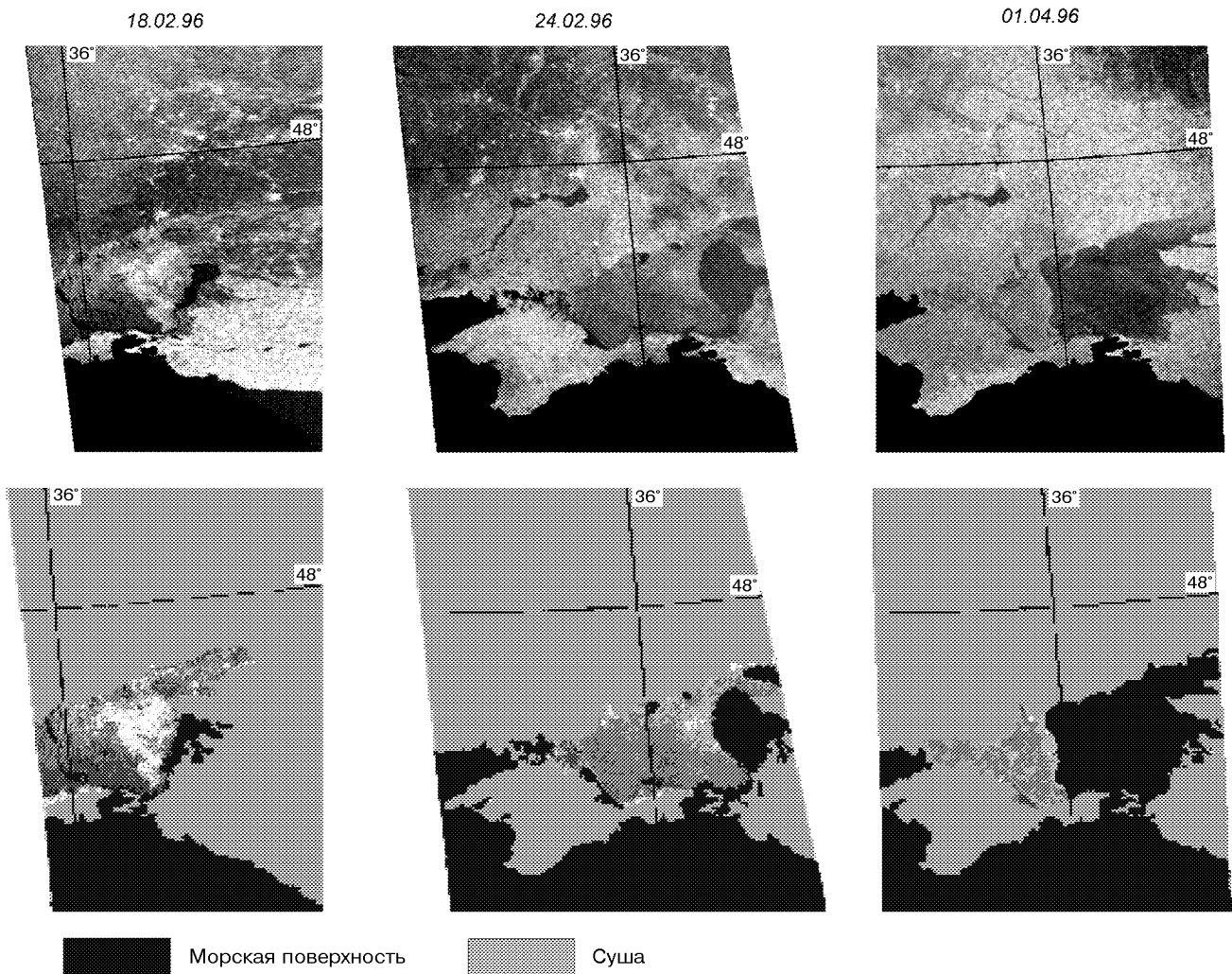


Рис. 7. Динамика ледяного покрова в Азовском море

льдообразования в бассейнах Черного и Азовского морей. На рис. 7 представлены РЛ-изображения акватории Азовского моря, полученные РБО ИСЗ «Січ-1». Там же приведены результаты тематической обработки, позволяющие проследить динамику изменения ледовой обстановки. Подобная информация представляет несомненный интерес при осуществлении навигации в бассейне Азовского моря.

НАБЛЮДЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА СУШИ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД ГОДА

Для снежного покрова характерна высокая пространственная изменчивость физических свойств, обусловленная макро-, мезо- и микромасштабными

процессами в атмосфере, рельефом, растительным покровом и т. п. В пределах одного климатического района аккумуляция снега происходит определенным, характерным для данных ландшафтных условий, образом. При этом растительный покров, определяющий в основном пространственную изменчивость снежного покрова, оказывается под воздействием этой изменчивости. Хорошо известно влияние разных типов лесов на аккумуляцию снега.

Толщина снежного покрова является одной из основных характеристик, поскольку существует связь между толщиной снега и его свойствами, в частности с тепловым режимом, и как следствие, с его способностью изолировать поверхность Земли от внешних воздействий. Хотя температурные градиенты и обусловленный ими метаморфизм снежного покрова ярче выражены при небольшой глуби-

не снега, снежный покров одинаковой толщины, находящийся на разных стадиях метаморфизма, может иметь различный температурный режим при сходных погодных условиях.

Снег может обладать разными физическими свойствами в зависимости от формы кристаллов. По мере уплотнения снежного покрова изменяется его толщина и теплопроводность, т. е. необходимо учитывать его свойства за весь период существования. При этом особенно важны периоды в начале формирования снежного покрова, во время снеготаяния, и особенно в период с резкими температурными перепадами.

Основной вклад в величину удельной ЭПР заснеженной земной поверхности могут давать следующие механизмы рассеяния: рассеяние на шероховатой границе раздела «воздух—снег», рассеяние на объемных (внутренних) неоднородностях снега, рассеяние на шероховатой границе раздела «снег—почва» [15].

В зависимости от толщины и структуры снежного покрова, температуры и влажности почвы и снега, непосредственного воздействия солнечной радиации и других факторов, относительный вклад перечисленных механизмов рассеяния может быть различным. Одним из основных параметров, определяющим характер рассеяния радиоволн снежным покровом, является глубина проникновения радиоволн (толщина скин-слоя) l_3 [12]:

$$l_3 = \frac{\lambda \sqrt{\varepsilon'}}{2\pi \varepsilon''} \quad (\varepsilon'' \ll \varepsilon'),$$

где λ — длина зондирующей радиоволны.

В СВЧ-диапазоне для сухого снега при отрицательных температурах, как следует из [12], действительная часть ε' практически не зависит от температуры и частоты и является функцией плотности снега ρ_c , изменяясь от $\varepsilon' \approx 1.2$ при $\rho_c = 0.1 \text{ г/см}^3$ до $\varepsilon' \approx 2.8$ при $\rho_c = 0.8 \text{ г/см}^3$. Плотность ρ_c , в свою очередь, определяется условиями выпадения снега (скорость ветра, температура и т. д.) и изменениями гидрометеоусловий в течение всего периода с момента образования снежного покрова до момента наблюдений. Затухание радиоволн при их распространении в снеге (при отсутствии свободной влаги) определяется тангенсом угла потерь $\text{tg} \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$, величина которого на частоте 10 ГГц изменяется от $5 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ при изменении температуры от -5°C до -30°C .

Таким образом, для сухого снега толщина скин-слоя может достигать нескольких метров. В предположении, что объемные неоднородности снежной массы (элементарные рассеиватели) распределены равномерно по глубине, величина УЭПР, связанная

непосредственно с объемным рассеянием, прямо пропорциональна толщине снежного покрова (сухого и однородного по глубине). Рассеянием на границе «воздух—снег» можно пренебречь по крайней мере по двум причинам: во-первых, из-за малого «контраста» (скачка ε') на границе «воздух—снег», во-вторых — из-за сравнительной «гладкости» поверхности снега в сантиметровом диапазоне радиоволн. Что же касается рассеяния на границе «снег—почва», то вклад этого механизма при отрицательных температурах также является значительно ослабленным из-за близости значений ε снега и промерзшей почвы.

По мере повышения температуры и увеличения влажности m_v снега (появления свободной воды) поглощение в снеге значительно увеличивается (при $\rho_c \approx 0.25 \text{ г/см}^3$ и $m_v \approx 2\%$ на частоте 10 ГГц ε'' увеличивается на три порядка и достигает значения 0.1). При этом l_3 уменьшается до нескольких сантиметров, так что рассеяние радиоволн поверхностью почвы полностью экранируется даже достаточно тонким снежным покровом.

При переходе от отрицательных температур к положительным, а тем более во время интенсивного таяния, наблюдается снижение уровня рассеянного сигнала из-за появления больших площадей влажного снега с практически гладкой поверхностью, а тем более участков воды. Зависимость σ° от толщины снежного покрова при этом полностью нивелируется, так как из-за малой величины δ весь процесс рассеяния происходит в тонком приповерхностном слое толщиной не более 1 см (для $\lambda = 3 \text{ см}$).

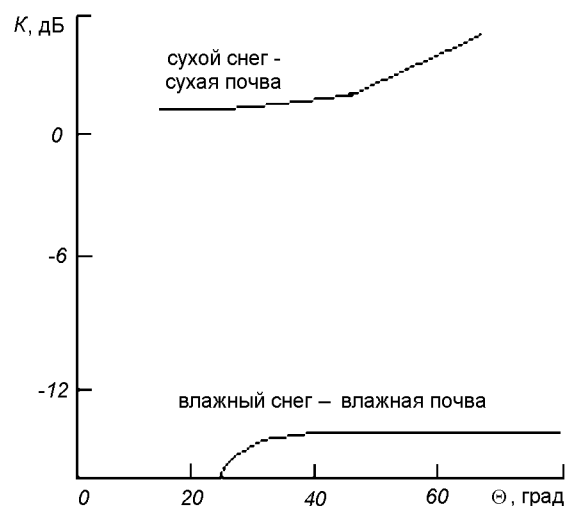


Рис. 8. Значения контрастов сухой снег — сухая почва и влажный снег — влажная почва ($m_v = 30\%$ от угла падения Θ)

В работе [6] показано, что отношение удельных ЭПР сухого снега и почвы положительно, слабо зависит от угла падения и не превышает в диапазоне углов 20° — 70° величины $K_{\max} \approx 5$ дБ, что видно из рис. 8. В то же время отношение УЭПР влажного снега относительно почвы с объемным влагосодержанием около 30 % отрицательно и достигает 14 дБ.

В качестве примера на рис. 9, а приведено радиолокационное изображение ИСЗ «Сич-1», отображающее характерную ситуацию на востоке Украины в феврале 1996 г. Начавшаяся оттепель привела к таянию снега на юге Украины. На изображении четко просматривается граница распространения снежного покрова. Южнее ее наблю-

дается положительный контраст, связанный с рассеянием от влажной шероховатой поверхности почвогрунтов. Севернее изображение имеет малую интенсивность, что вызвано ослаблением отраженного сигнала в слое мокрого снега с влагосодержанием более 60 см. Зона такого снега распространяется до линии городов Луцк—Киев—Кременчуг.

В северной части Украины погодные условия другие. Здесь температура воздуха не превышает 0°C и влагосодержание снежного покрова не более 40 см. Определяющим механизмом рассеяния в этой зоне является объемное рассеяние в снеге. В результате интенсивность в этой части изображения выше, чем в зоне со снегом, содержащим большое количество влаги.

а

б

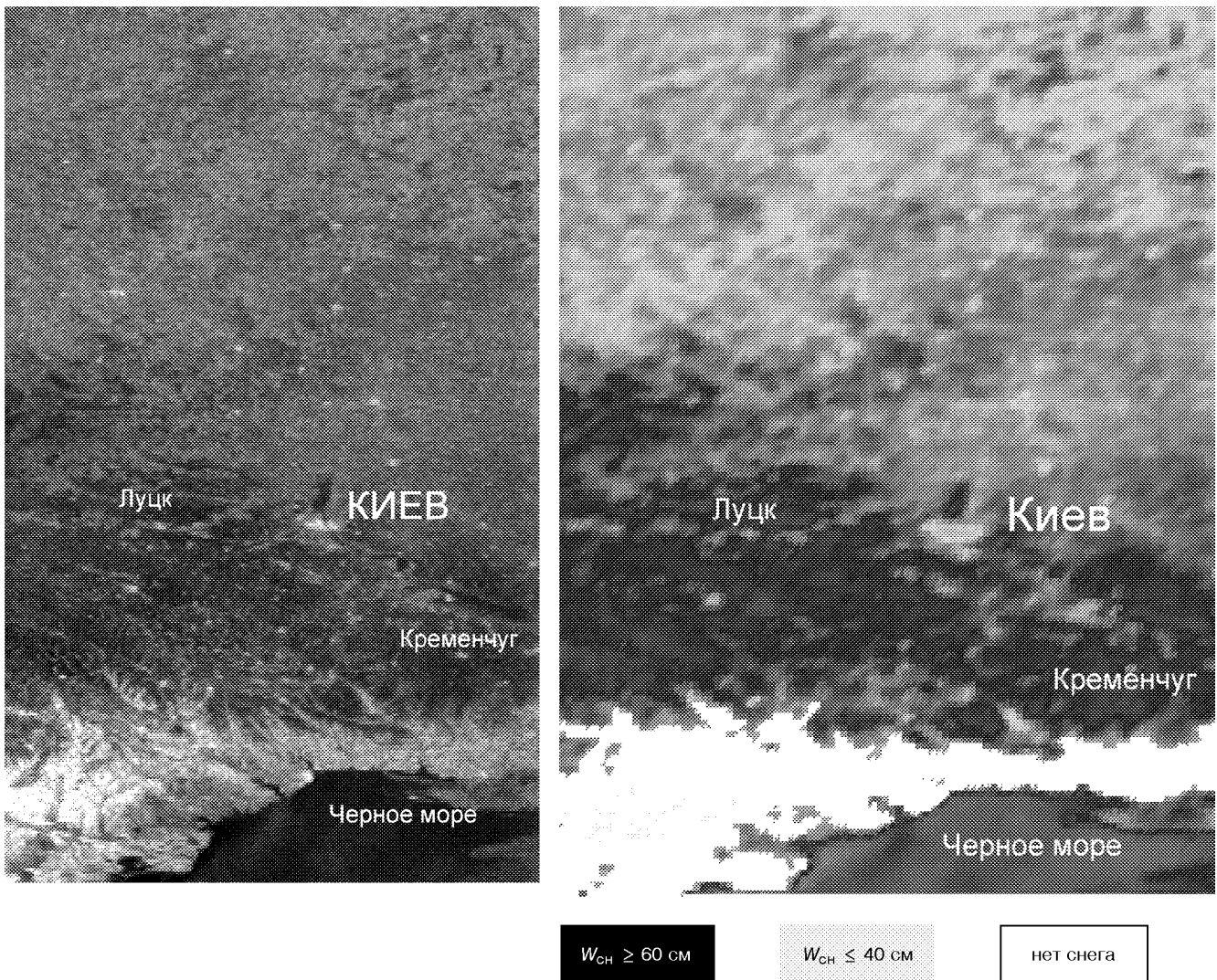


Рис. 9. Границы снежного покрова и его влагосодержание w , см. на территории Украины 21 марта 1996 г.

Обработка этих данных позволила получить тематическую карту распространения границы снежного покрова и его областей с различным содержанием влаги. Карта представлена на рис. 9, б. Полученные результаты достаточно хорошо коррелируют с данными сети наземных метеостанций и существенно дополняют их. В частности, при относительно редкой сети наземных станций они позволяют точнее определять границы снежного покрова и зон различного влагосодержания в снеге. Подобная информация представляет значительный интерес при разработке прогнозов таяния снега и интенсивности ожидаемого паводка.

РЛ информация ИСЗ «Сич-1», полученная в зимний период года, может использоваться для прогнозирования размеров зон подтоплений в период весеннего паводка. Об этом свидетельствует пример двух РЛИ от 24.02.96 и от 04.04.96. На рис. 10, а светлым тоном выделяются замерзшие поймы рек бассейна Днепра и бассейна реки Северский Донец в зимний период. В период весеннего паводка (рис. 10, б) поймы этих же рек выделяются темным тоном, что обусловлено более низким уровнем рассеяния от водной поверхности поймы по сравнению с уровнем рассеяния от снежного покрова. Как видно, пространственные размеры замерзших пойм и подтопленных участков в весенний период практически совпадают.

МОНИТОРИНГ ЗОН СВЕЖЕВЫПАВШИХ ОСАДКОВ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ДАННЫМ

Весьма перспективным представляется оперативное использование данных обзорных радиолокационных систем космического базирования для опреде-

ления пространственных и количественных характеристик свежес выпавших осадков как на региональном уровне, так и в глобальном масштабе. Результаты радиолокационной съемки из космоса позволяют существенно увеличить количество и качество метеорологической информации.

На сегодняшний день сеть гидрометеостанций не позволяет детально исследовать пространственную структуру выпадающих осадков в виде дождей, так как во многих районах эта сеть является достаточно редкой, и не все проявления осадков могут быть зафиксированы, особенно если они имеют малую среднюю скорость переноса и относительно небольшие пространственные размеры. Возможность определения влажностных характеристик почвы по данным радиолокационного зондирования рассматривалась в ряде работ (например [10, 16]) и основывается на существующих связях УЭПР с диэлектрической проницаемостью почвы. В свою очередь диэлектрическая проницаемость связана с влажностью почвы. Согласно [11] в первом приближении зависимость комплексной диэлектрической проницаемости почвы $\tilde{\epsilon}_D$ от влажности w в сантиметровом диапазоне радиоволн имеет линейный характер:

$$\tilde{\epsilon}_D = \epsilon_0 + (\epsilon_0 - 1)\tilde{\epsilon}_w w,$$

где w — относительная влажность почвы, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость почвы при отсутствии воды, $\tilde{\epsilon}_w$ — комплексная диэлектрическая проницаемость воды. Зависимость $\tilde{\epsilon}_w$ воды от температуры (T) и длины радиоволны λ в [16] аппроксимируется выражением:

$$\tilde{\epsilon}_w = 5 + \frac{\epsilon_s - 5}{1 + i \frac{\lambda_s}{\lambda}} - i60\lambda\xi,$$

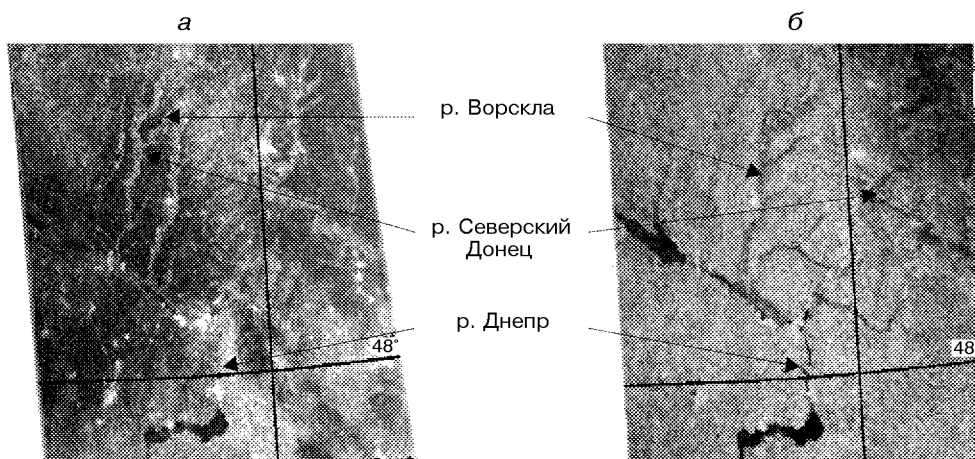


Рис. 10. Сезонные РЛИ бассейнов рек Днепр, Северский Донец, Ворскла (а — зимний период года, б — в весенний период года). Наблюдается изменение контрастов пойменной части рек

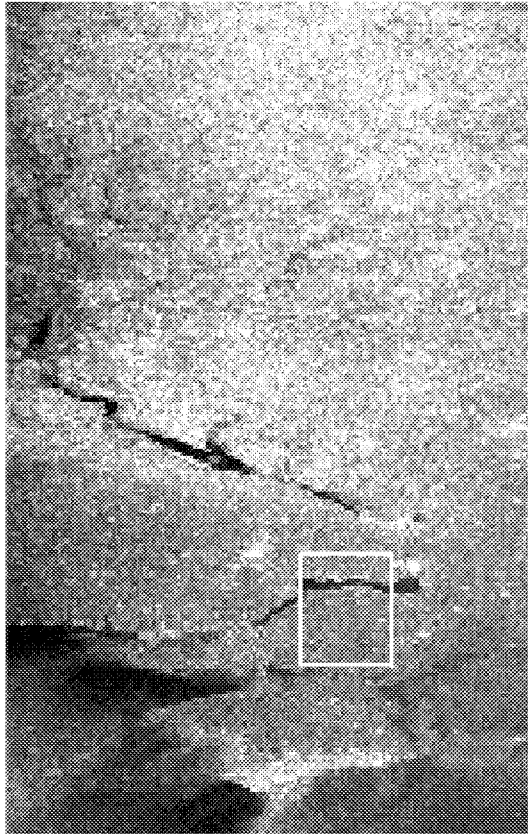


Рис. 11. Радиолокационное изображение поверхности суши до выпадения дождей)

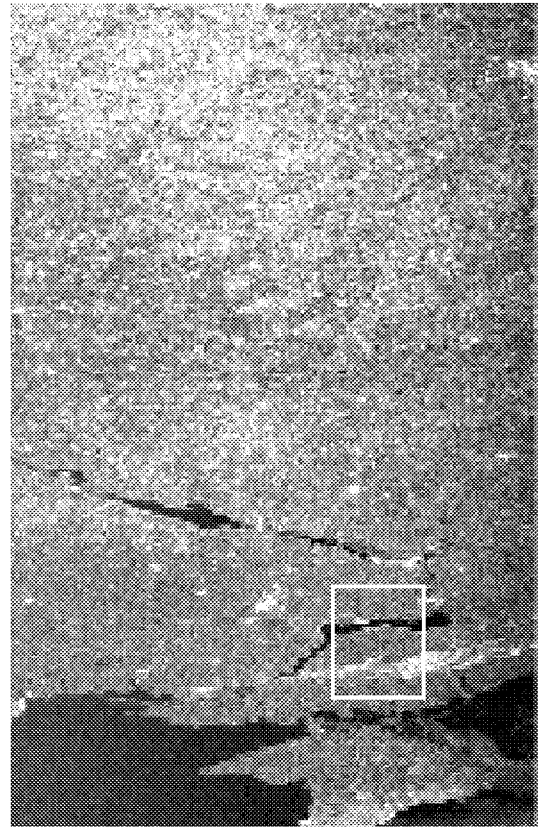


Рис. 12. Радиолокационное изображение поверхности суши с зонами выпавших осадков

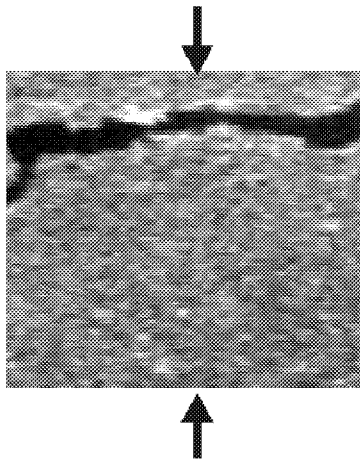


Рис. 13. Фрагмент РЛ-изображения 21.04.96

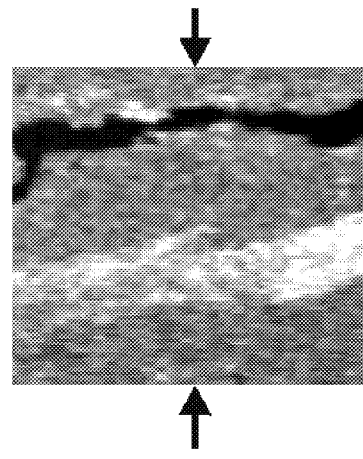


Рис. 14. Фрагмент РЛ-изображения 24.04.96

где $\epsilon_s = 88 - 0.4T + 8 \cdot 10^{-4}T^2$, $\lambda_s = 1.9 - 0.0026T + 1.4e^{-0.063T}$.

Проводимость растворенных в воде солей ξ связана с концентрацией солей S соотношением $\xi = S(85 + 3.4T)$.

Однако получение практических результатов и

оценок влажности почвы по данным радиолокационной съемки в натуральных условиях затруднительно. Последнее обстоятельство связано с отсутствием моделей, адекватно описывающих процессы рассеяния радиоволн природными почвогрунтами, многообразием ситуаций, возникающих при проведении

измерений в натуральных условиях, ограниченным объемом экспериментальных данных и т. д. Кроме того, необходимо учитывать особенности формирования информации радиолокационными системами, которые применяются для проведения измерений (рабочая длина радиоволны, углы наблюдения, пространственное разрешение и т. д.).

Вместе с тем регулярный мониторинг РБО «Січ-1» территории Украины позволил провести экспериментальные исследования по оценке возможности практического использования данных космических РБО для определения влажности в верхнем слое почвы.

Ниже в качестве примера приведены изображения, полученные РБО ИСЗ «Січ-1» 21.04.96 г. — при сухой погоде, и 24.04.96 г. — сразу после дождя (рис. 11, 12). Наличие выпавших осадков подтвердили результаты съемки в оптическом и ИК-диапазонах, полученные ИСЗ NOAA-12 синхронно с радиолокационными данными, и материалы наземных наблюдений подразделениями Гидрометцентра Украины.

Для определения зон выпадения осадков был выбран фрагмент на РЛИ в районе южнее Каховского водохранилища. Данная территория характеризуется как равнина без лесных массивов с естественной степной растительностью. Почвы в основном черноземные, к югу — суглинистые, местами — глинистые и песчаные.

На радиолокационном изображении зоны свежес выпавших осадков проявляются в виде областей с повышенной отражательной способностью. На рис. 13 и 14 представлены фрагменты изображений 21.04.96 г. и 24.04.96 г., соответствующие выбранному участку. На фрагменте рис. 14 явно выделя-

ются зоны выпадения дождей, тогда как на другом эти зоны отсутствуют. Зоны проявляются в виде неоднородных областей с повышенной интенсивностью отражений.

Для определения значений радиолокационных контрастов по зонам свежес выпавших осадков и без них использованы значения УЭПР, полученные из радиолокационных изображений. Радиолокационные контрасты определялись как $K = 10 \lg \frac{\sigma_m^0(\Theta)}{\sigma_0^0(\Theta)}$,

где σ_m^0 и σ_0^0 — значения УЭПР в зоне свежес выпавших осадков и без них соответственно.

Для оценки радиолокационных контрастов использовались разрезы по столбцу изображения. С учетом орбитальных параметров ИСЗ и режима радиолокационной съемки столбца на приведенных изображениях выбирались для одинаковых значений угла Θ . Пример значения сигнала по столбцу изображения представлен на рис. 15. Значения радиолокационного контраста K представлены на рис. 16.

Как видно, максимальный контраст в зоне свежес выпавших осадков достигает 6 дБ. Зона свежес выпавших осадков, выделенная на радиолокационном изображении, коррелирует с данными контактных измерений, проведенных подразделениями гидрометеослужбы, а полученные значения контраста соответствуют дождю средней интенсивности.

Анализ радиолокационных данных, полученных в период эксплуатации РБО ИСЗ «Січ-1», показал, что с привлечением известных моделей рассеяния радиоволн земной поверхностью и регрессионных зависимостей, построенных по базовым данным радиолокационной съемки, можно получать инфор-



Рис. 15. Значения УЭПР для изображений рис. 13 и 14

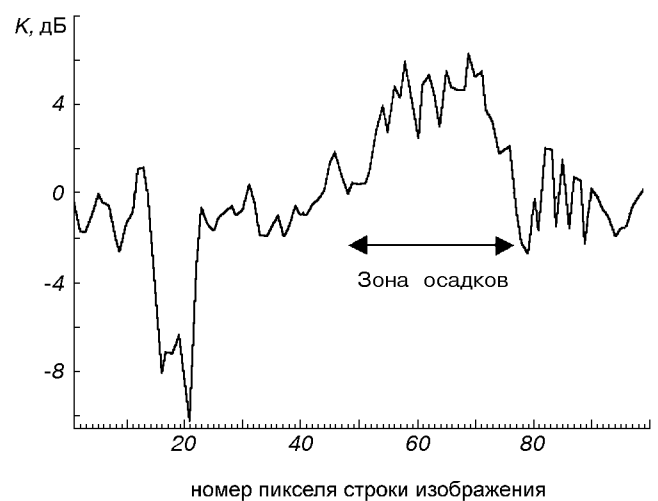


Рис. 16. Контрасты по зоне свежес выпавших осадков

мацию о пространственном распределении осадков и оценивать их количество.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного в работе анализа показано, что с помощью информации, получаемой РБО космического базирования (установленных, в частности, на ИСЗ «Космос-1500», «Сич-1», «Океан») можно решать ряд важных гидрометеорологических задач.

На примерах анализа радиолокационных изображений, полученных РБО ИСЗ «Сич-1», в данной работе показано, что по данным радиолокационной съемки из космоса можно определять поля приводного ветра, обнаруживать зоны штормов и шквалов, контролировать энергоактивные процессы взаимодействия в системе «океан—атмосфера», в том числе обнаруживать, контролировать и измерять параметры ураганов и тайфунов, проводить работы по гидрометеорологическому обеспечению мореплавания в ледовых районах, наблюдать динамику развития снежного покрова и определять границы снеготаяния, зоны выпадения осадков.

Использование радиолокационных данных в комплексе с наземными измерениями может стать основой для создания в Украине оперативной службы прогнозирования критических ситуаций, связанных со снеготаянием, разливом рек, подтоплением берегов и т. п.

Дальнейшими перспективными направлениями могут стать исследования возможности адаптации описанных в работе методов интерпретации к радиолокационным данным, получаемым с помощью существующих и планируемых к запуску космических радиолокаторов с синтезированной апертурой типа RADARSAT, ERS, ENVISAT, LightSAR, а также детальная проработка методик интерпретации радиолокационных изображений применительно к конкретным гидрометеорологическим задачам с привлечением специалистов-гидрометеорологов.

1. Драновский В. И., Дюняшев В. В., Евдокимов А. П. и др. Комплекс радиофизической аппаратуры ИСЗ «Сич-1» // Космічна наука і технологія.—1998.—4, № 2/3.—С. 12—20.
2. Исследование ледяного покрова с помощью радиолокационных станций бокового обзора (РЛС БО) / А. В. Бушуев,

Ю. Д. Быченков, В. С. Лощилов, А. Д. Масанов. — Л.: Гидрометеоздат, 1985.—264 с.

3. Калмыков А. И., Пичугин А. П., Цымбал В. Н. Определение поля приводного ветра радиолокационной системой бокового обзора ИСЗ «Космос-1500» // Исслед. Земли из космоса.—1985.—№ 4.—С. 65—77.
4. Калмыков А. И., Цымбал В. Н. Использование радиолокационной спутниковой информации для изучения поля приводного ветра // Методические указания по комплексному использованию спутниковой информации для изучения морей. — Л.: Гидрометеоздат, 1987.—С. 100—136.
5. Кондратьев К. Я. Спутниковая климатология. — Л.: Гидрометеоздат, 1983.—263 с.
6. Кулемин Г. П., Харченко Т. Н., Яцевич С. Е. Дистанционное зондирование снега радиолокационными методами. — Харьков, 1992.—36 с.—Препринт ИРЭ НАНУ N 92-8.
7. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. — Л.: Гидрометеоздат, 1984.—752 с.
8. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов / Под ред. Б. А. Крутских. — Л.: Гидрометеоздат, 1984.—56 с.
9. Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. Ю. А. Мельника. — М.: Сов. радио, 1980.—262 с.
10. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л. М. Митника, Л. В. Викторова. — Л.: Гидрометеоздат, 1990.—200 с.
11. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Сколника. — М.: Сов. радио, 1976.—456 с.
12. Улаби Ф. Т. Радиолокационные сигнатуры земной поверхности и контроль возобновляемых ресурсов // ТИИЭР.—1982.—70, № 12.—С. 43—64.
13. Уткин В. Ф., Шестопалов В. П., Калмыков А. И. и др. Возможности определения параметров тропических циклонов по радиолокационным изображениям из космоса // ДАН СССР.—1986.—286, № 2.—С. 331—333.
14. Buss F. G., Fuks I. M., Kalmykov A. I., et al. Very high frequency radiowave scattering by a disturbed sea surface // IEEE Trans. Antennas Propagat.—1968.—16, N 5.—P. 554—559.
15. Hoekstra P., Deleney A. Dielectric properties of soils at VHF microwave frequencies // J. Geophys. Res.—1974.—79, N 11.—P. 1699—1708.
16. Ulaby F., Batlivala P. Optimum radar parameters for mapping soil moisture // IEEE Trans. Geosci. Electron.—1976.—14, N 2.—P. 91—92.

RADAR REMOTE SENSING OF THE EARTH FROM SPACE IN HYDROMETEOROLOGY

V. B. Efimov, I. A. Kalmykov, O. A. Krasnov, A. S. Kurekin, V. N. Tsymbal, V. A. Komyak, and S. Ye. Yatsevich

We present the experience gained in determining quantitative characteristics of the hydrometeorological phenomena in the atmosphere-ocean-land system with the use of the radar information from the satellites of the «Cosmos-1500», «Okean», «Sich-1» types.