

## 5. ДИНАМИКА ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОКРОВОВ НА РАЗНОСЕЗОННЫХ ДАННЫХ ALOS PALSAR

Л.Н. Захарова, А.И. Захаров  
ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН

**Аннотация.** Работа посвящена поляриметрическому анализу серии радиолокационных данных. Исследована зависимость выделяемых на изображениях типов механизмов рассеяния от погодных условий (температуры воздуха и выпавших осадков).

Поляриметрические радиолокационные данные, увеличивая, по сравнению с данными одной поляризации, поток информации в четыре раза, обогащают исследователей также возможностью исследовать фазовые соотношения между каналами, а также восстанавливать механизмы рассеяния на основе анализа матрицы когерентности.

Существующие к настоящему времени методы классификации земных покровов в случае разносезонных поляриметрических данных могут быть дополнены соотносением динамики поляриметрических свойств изображений одного и того же участка с вегетативным циклом для растительных покровов и погодными условиями.

В настоящей работе оценена влияние параметров внешней среды на результат поляриметрической классификации. Показано, что в условиях отрицательных температур результат классификации демонстрирует серьёзные отличия от результатов той же схемы классификации, применённой к летним съёмкам.

### МЕТОД ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОЙ ДЕКОПОЗИЦИИ

Метод поляриметрической декомпозиции, основанный на вычислении энтропии рассеяния и угла  $\alpha$  [1] широко используется для классификации механизмов рассеяния. В основе метода лежит анализ матрицы когерентности  $T$ , элементы которой вычисляются при помощи преобразования матрицы рассеяния  $S$

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

в вектор рассеяния  $k$ , который в базисе Паули выглядит следующим образом:

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ 2S_{HV} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

и последующего умножения  $k$  на  $k^*$ , где \* означает эрмитово сопряжение:

$$[T] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* & (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* & 2(S_{HH} + S_{VV})S_{HV}^* \\ (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* & (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* & 2(S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \\ 2S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* & 2S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* & 4S_{HV}S_{HV}^* \end{bmatrix} \quad (3).$$

После приведения самосопряжённой матрицы  $T$  к диагональному виду

$$[T] = [U] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [U]^*{}^T, \quad (4)$$

$$[U] = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \cos \alpha_2 & \cos \alpha_3 \\ \sin \alpha_1 \cos \beta_1 e^{i\delta_1} & \sin \alpha_2 \cos \beta_2 e^{i\delta_2} & \sin \alpha_3 \cos \beta_3 e^{i\delta_3} \\ \sin \alpha_1 \sin \beta_1 e^{i\gamma_1} & \sin \alpha_2 \sin \beta_2 e^{i\gamma_2} & \sin \alpha_3 \sin \beta_3 e^{i\gamma_3} \end{bmatrix},$$

когда на главной диагонали стоят собственные числа матрицы, можно вычислить параметры  $H$  и  $\alpha$  при помощи следующих формул:

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (i=1,2,3), \quad (5)$$

$$H = \sum_{i=1}^3 -P_i \log_3 P_i, \quad \alpha = \sum_{i=1}^3 P_i \alpha_i, \quad (6)$$

Таким образом, энтропия  $H$  — это мера близости собственных чисел друг к другу, а  $\alpha$  — усреднённое значение параметров  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , взятых с весами, соответствующими величинам нормированных собственных чисел.

Предлагаемая авторами [1] классификация основывается на одновременном анализе обоих параметров: угла  $\alpha$  и энтропии  $H$ . Область значений энтропии делится на три части: слабой (менее 0.5), умеренной (от 0.5 до 0.9) и высокой (от 0.9 до 1.0) энтропии. Каждый из этих надклассов делится, в свою очередь, на три части, в зависимости от значения угла альфа. Таким образом, получается девять классов, каждый из которых соответствует своему типу и механизму рассеяния. Следует отметить, что, чем выше энтропия, тем меньше интервал значений, которые принимает угол  $\alpha$ . Так, никакой физической объект не даст сочетания  $H$  и  $\alpha$ , попадающего в прямоугольник, соответствующий малым значениям угла  $\alpha$  при высокой энтропии (показан белым цветом на рис. 1).

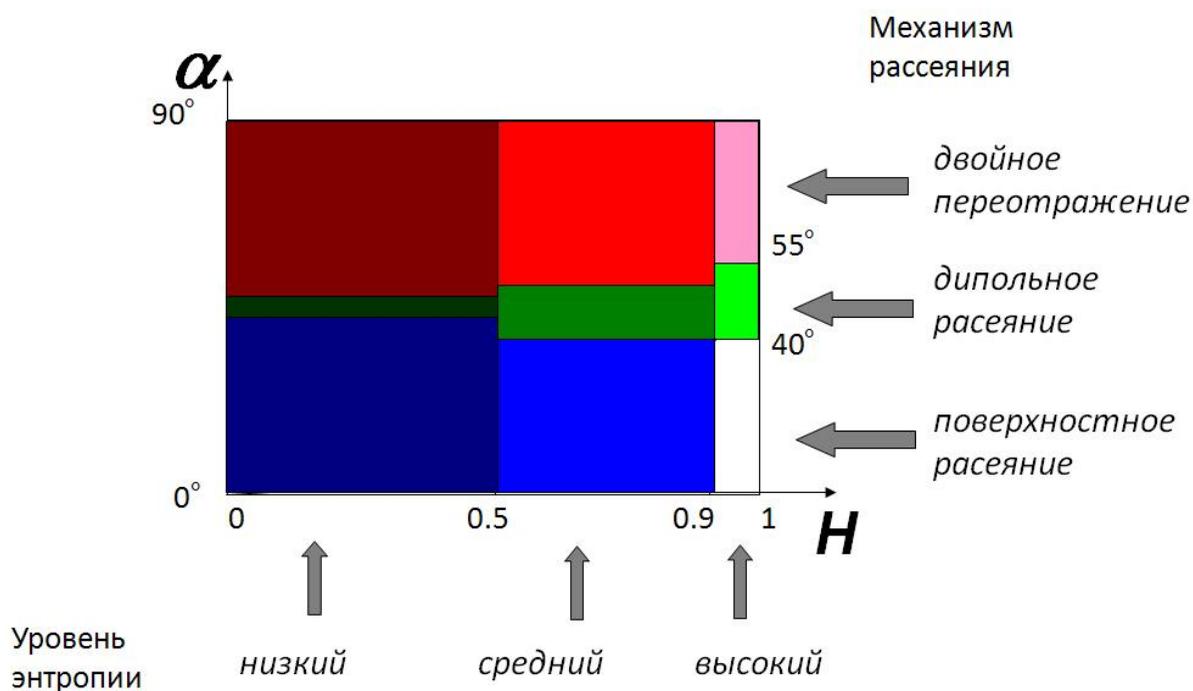


Рис. 1. Цветовая схема классификации механизмов рассеяния при помощи параметров  $H$ – $\alpha$ .

Наращение энтропии соответствует увеличению шероховатости поверхности и/или усложнению структуры растительности, формирующей объёмную составляющую рассеяния. Сочетание низкой и умеренной энтропии с углом  $\alpha$ , не превосходящим  $40^\circ$ , соответствуют протяжённым целям с доминирующим поверхностным типом рассеяния. На изображениях-классификациях такие объекты имеют тёмно-синий и ярко-синий цвет. Величина угла  $\alpha$  около  $45^\circ$  соответствует дипольному типу рассеяния, и, как правило, встречается на поросших лесом поверхностях. В

зависимости от величины энтропии разные оттенки зелёного обозначают эти три класса. Дальнейший рост угла  $\alpha$  означает преобладание двойного (и многократного) переотражения, свойственного как естественным объектам (лес), так и созданным человеком (здания, ограды, элементы инфраструктуры), красный цвет различной интенсивности.

### ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для обработки были использованы данные ALOS PALSAR, снятые в поляриметрическом режиме в 2006–2008 годах по территории дельты р. Селенги, впадающей в озеро Байкал. Была рассмотрена последовательность из 12 съёмки для различных времён года. Для этого же участка имеются обработанные данные от октября 1994 года (съёмка PCA SIR-C на борту космического аппарата Shuttle Endeavor), также поляриметрические [2,3].

При первом рассмотрении классификация, приведённая на рис. 2, не слишком разнообразна: присутствует синий цвет — протяжённые цели с поверхностным механизмом рассеяния приходятся на «поверхностные» классы, затем два оттенка зелёного — области, покрытые богатой растительностью, попадают в два «дипольных» класса, и, наконец, красный: двукратно отражённый сигнал соответствует классам повышенных значений угла  $\alpha$ .

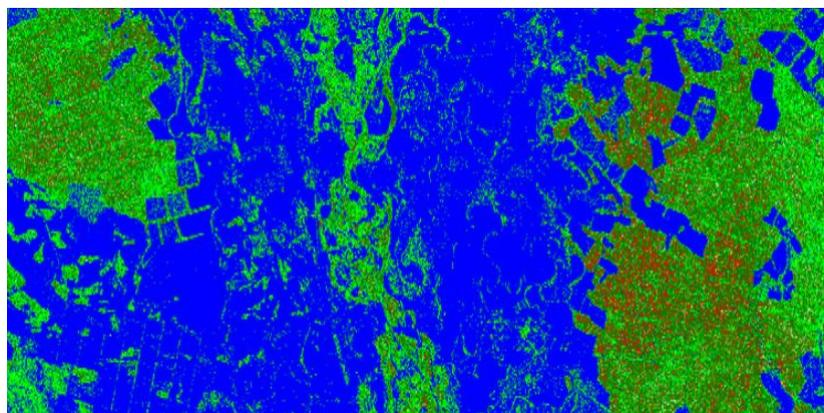


Рис. 2. Результат классификации механизмов рассеяния по данным SIR-C.

По сравнению с классификацией интенсивностей (особенно для сочетания разных поляризационных каналов) бросается в глаза меньшая детальность классификации для безлесных поверхностей: все они попадают в один класс, тогда как первая даёт значительно большее разнообразие классов открытых поверхностей. На рис.3 показан пример кластеризации трёх интенсивностей (каналы HH, HV и VV). На лес

## Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

приходится всего два класса (светло- и средне-серый), при этом для окружающих полей и лугов набирается до шести классов. В обеих классификациях трудно различимы вода и гладкая земная поверхность.

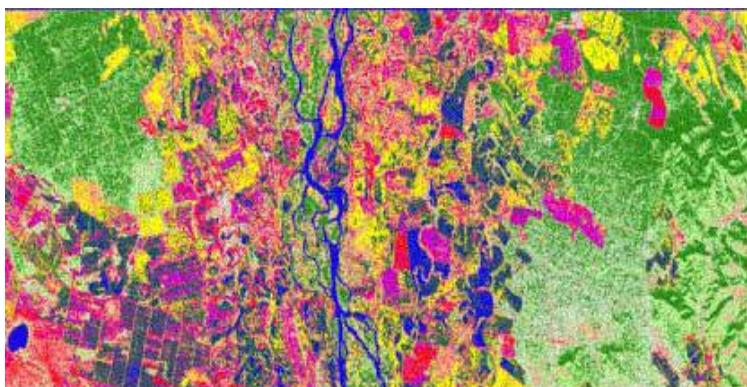


Рис. 3. Результат классификации трёх поляризационных каналов по данным SIR-C.

### СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ КЛАССОВ

Наличие 12 сцен поляриметрической съёмки для восточного побережья Байкала позволило обнаружить интересные сезонные закономерности. На рис. 4 приведены 12 карт классов для той же территории, что и на рис.2,3 (некоторые со смещением).

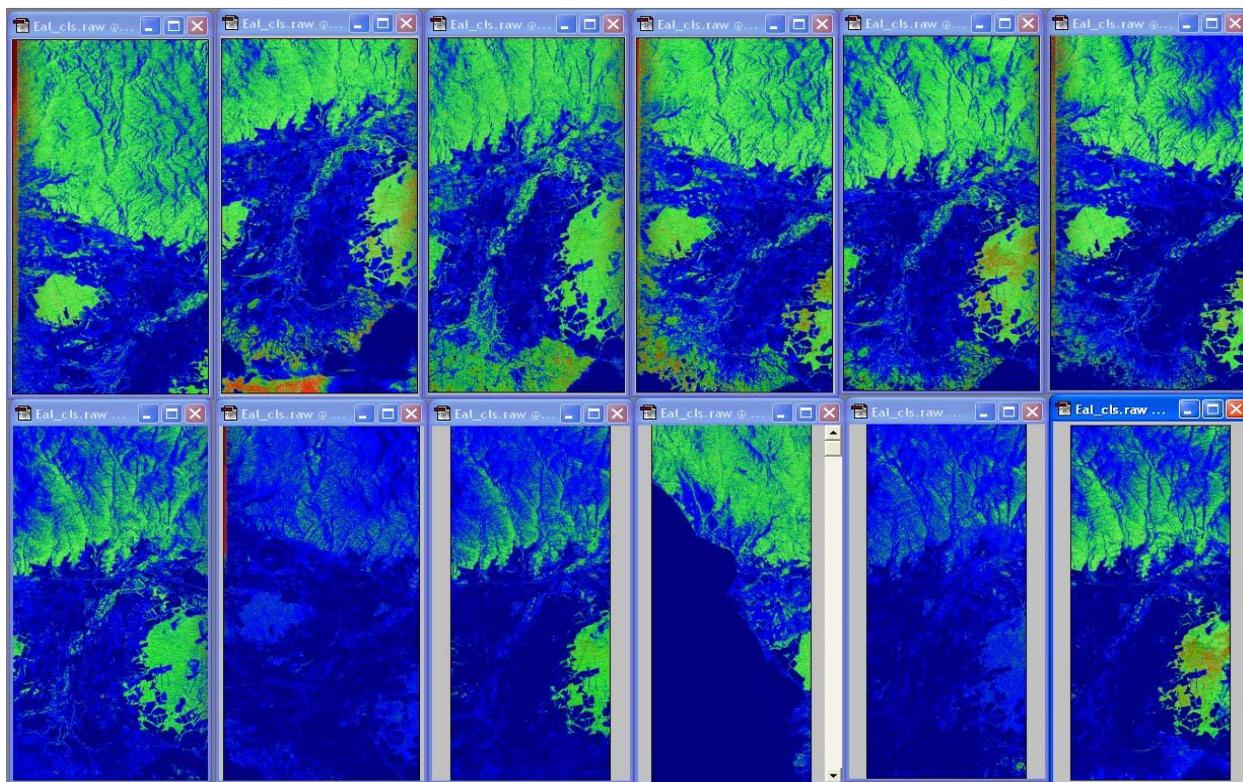


Рис. 4. Результат Н- $\alpha$ -классификации по данным ALOS PALSAR, верхний ряд: 28 мая, 28 июня, 13 авг., 30 авг., 28 сент., 15 окт. 2006 г., нижний ряд: 13, 30 нояб. 2006 г., 31 мар., 2 июня, 16 нояб. 2007г., 2 апр.2008 г.

## Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

Каждая из двенадцати карт классификации в отдельности на рис. 4 напоминает рис. 2: то же небольшое количество классов: зелёного оттенка леса, тёмно-синие водные и слабошероховатые участки на суше, ярко-синие более шероховатые поверхности, красные вкрапления двойного переотражения. Расположение кадров на рис.4 таково, что они охватывает значительно большую площадь земной поверхности по сравнению с рис.2,3: добавились поросшие лесом отроги хребта Хамар-Дабан (верхняя часть кадров на рис.4), а также на большинстве кадров видна собственно дельта, весьма разветвлённая и богатая растительностью, и, кроме того, часть акватории Байкала (нижняя часть кадров на рис. 4). Таким образом, сцене SIR-C на рис. 2,3 соответствует средняя часть кадров на рис. 4 с двумя лесами по краям: более компактным Истоминским в левой части (особенно хорошо заметен на верхнем левом кадре) и сложно очерченным Дубининским в правой части изображений (лучше всего заметен на нижнем правом кадре рисунка 4).

Всюду, где на картах классификации присутствует двойное переотражение (красные вкрапления на зелёном фоне), сравнение двух лесов оказывается в пользу хвойного Дубининского: смешанный Истоминский лес всегда показывает меньшее количество участков двойного переотражения, что связано, предположительно, с разницей в объёмной структуре леса.

Два кадра из приведённых двенадцати выбиваются из общей картины (второй и пятый слева в нижнем ряду, даты 30 ноября 2006 года и 16 ноября 2007 года): в них на лесах не только не наблюдается двойного переотражения, но и полностью отсутствуют классы дипольного рассеяния, и лес классифицируется как поверхностно рассеивающая протяжённая цель: так, как на других кадрах показаны поля с повышенной шероховатостью. Погодные условия в эти дни заметно отличались от условий на всех других снимках: мороз до  $-10^{\circ}\text{C}$ . Если обратить внимание на верхнюю часть снимков, где расположены лесистые отроги гор, тот же эффект, хотя и в меньшем масштабе, заметен и в другие осенне-весенние дни: 15 октября и 13 ноября 2006 года, 31 марта 2007 года, 2 апреля 2008 года со слабоотрицательными температурами, зарегистрированными на ближайшей метеостанции Улан-Удэ. Объяснение следует искать в том факте, что с увеличением высоты над уровнем моря температура поверхности убывает, и в горах холоднее, чем на равнине. Таким образом, температурные условия сказываются на механизме рассеяния.

Ещё один эффект, связанный с погодными условиями, связан с областями двойного переотражения (показаны красным на рис. 4). Даты, для которых оно наиболее сильно выражено: 28 июня, 30 августа, 28 сентября, 15 октября 2006 года, 2 апреля 2008 года. Все эти дни характеризуются сухой ясной погодой (кроме 28 июня, когда прошёл слабый дождь). В дни, когда был сильный ливень (30 мая и 13 августа 2006 года), эффект двойного переотражения заметно ослабевает. Вероятно, сигнал не проходил сквозь насыщенную влагой крону настолько, чтобы ещё отразиться от поверхности почвы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено сравнение поляриметрических характеристик, вычисляемых на основе матрицы когерентности, для ряда сцен, полученных РСА космического базирования PALSAR. Прослежены сезонные вариации и зависимость от погодных условий на примере данных по Прибайкалью. Прделанная работа позволяет сделать вывод о важности учёта метеорологических параметров при проведении поляриметрического анализа радиолокационных данных и основанной на нём процедуры классификации земных покровов.

### ЛИТЕРАТУРА

Land Applications of Polarimetric SAR// IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.—1997.—Vol. 35.—No. 1—P. 68–78.

Захарова Л.Н., Захаров А.И., Дарипов Д.Д., Кирбижекова И.И. Использование данных дистанционного зондирования для классификации и анализа состояния подстилающих покровов в районе озера Байкал// Труды VI Международной научно-технической конференции ФРЭМЭ. Владимир, 21-23 апреля 2004 года — С.134–137.

Zakharova L. Study of natural objects in Transbaikalia by means of polarimetry and polarimetric interferometry. // Proc. 5<sup>th</sup> European Conference on Synthetic Aperture Radar, Ulm, Germany, May 25-27, 2004. — С.134–137.