

Экологическая и инженерная геофизика

Классификация дистанционно регистрируемых изображений для поверхностного геологического картирования на Канадском Севере**Classification of remotely sensed imagery for surficial geological mapping in Canada's North**

Leff Harris, Eric Grunsky и Ian McMartin (Геологическая Служба Канады) рассматривают современные возможности использования дистанционной регистрации при составлении близповерхностных карт с целью выявления полезных ископаемых в удаленных регионах северной Канады.

Картирование на Севере является дорогостоящим проектом из-за удаленности, отсутствия инфраструктуры, логистических трудностей и, главным образом, короткого сезона картирования. Данные дистанционной регистрации предлагают эффективный источник информации для геологов не только для улучшения существующих геологических карт, но и как источник геологической информации первого порядка в регионах, не имеющих соответствующих карт. Излишне говорить, что регионы, не покрытые детальным геологическим картированием, охватывают многие области Северной Канады.

Геологическая Служба Канады (GSC) взяла обязательство по проекту картирования обширных районов Канадского Севера посредством так называемого «Обнаружения полезных ископаемых методом Дистанционного Прогнозного картирования» (PRM), которое является частью Программы Развития ресурсов Севера Сектора Наук о Земле (ESS). PRM является инициативным проектом, предназначенным для работы в обширных труднодоступных северных регионах, использующим данные дистанционной регистрации и геофизические данные при полевых работах, расширяя области геологического картирования и обеспечивая максимальный экономический эффект. Данные дистанционной регистрации в рамках проекта PRM будут содействовать составлению цифровых карт, которые станут предсказывающими, надежными, количественно охарактеризованными и покроют значительные области.

Метод PRM отличается от обычных методов картирования Севера, которые традиционно опираются на равномерную сеть профилей, расположенных в районе исследования на расстоянии от 1 до 5 км друг от друга независимо от сложности геологии и дополняется интерпретацией данных аэрофотосъемки. Преимущество карт PRM заключается в том, что они могут отображать как однородные, так и неоднородные в геологическом отношении области, придавая большую выразительность полю в сложных областях. К тому же, значения, которые извлекаются из различных геологических баз данных в пределах области исследования, могут быть использованы для предсказания областей с подобной геологией, где картирование невозможно.

Статья нацелена на использование данных дистанционной регистрации (RADARSAT-1 SAR (Synthetic Aperture Radar – радар с синтетической апертурой), LANDSAT 7 ETM+) совместно с данными цифровой модели рельефа (DEM) для получения прогнозных карт (классификации) поверхностных участков в районе Schultz Lake (NTS 66A), Nunavut и основана на работах Grunsky (2002) и Grunsky и др. (2006). Применяется автоматизированный (выполняемый с помощью вычислительной машины) подход к решению, который включает опознанные представленные области на аэрофотоснимках (подтвержденные полевыми работами) различных приповерхностных участков, признаки этих «районов обучения», собранные по данным дистанционно регистрируемых изображений, а затем определяя аналогичные по изображению области, используя классификационный алгоритм максимального правдоподобия. Методология для составления предсказывающих карт приповерхностных участков, представленная в этой статье, может быть использована в других ситуациях на Севере.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ.

Летом 2004 года GSC провела картирование четвертичных отложений в районе Schultz Lake (NTS 66A) в центральном Nunavut (McMartin and Dredge, 2005; McMartin и др., 2005). Это картирование совместно с картированием методами RPM поможет пониманию направления движения льда, источника ледниковых отложений, и будет содействовать выявлению приповерхностных комплексов, которые расширят поиски полезных ископаемых, в особенности направленные на золото и алмазы.

Область Schultz Lake (рис. 1) включает район Baker Lake, расположенный приблизительно в 300 км в сторону суши от западного берега Гудзонова залива. Рельеф является сглаженным, с превышениями, колеблющимися от около 3 м на озере Baker Lake до 283 м над уровнем моря вдоль хребта коренных пород к западу от Pitz Lake (рис. 2). Область лежит в пределах территории архейской группы Западной провинции р. Черчилл и подстилается архейскими гранитоидами и гнейсовыми породами и метаморфизованными архейскими и протерозойскими осадками и вулканическими породами (рис. 3) (Hadlari и др., 2004). Область также перекрыта мощными пачками характерных красных вулканических и осадочных пород протерозойского суперкомплекса Dubawnt. Наносы относительно мощные (>5 м) и более распространены к югу от р. Thelon, образуя холмистую ледниковую равнину отбегавшей формы. Напротив, к северу от реки преобладают менее мощные ледниковые наносы, и коренные породы местами выходят на поверхность. Морские (и/или ледниково-озерные) осадки встречаются на слабо дренированных (осушенных), низко расположенных участках местности, или образуют группы приподнятых береговых структур по краям ледниковых отложений и обширные поднятия коренных пород. Изучаемый район преимущественно лишен флювиогляциальных осадков, хотя к северу и югу от Schultz Lake присутствуют ограниченные участки, которые имеют доказательства предледниковой и послеледниковой эрозии под воздействием образующейся талой воды (т.н. валунные поля). Генерализованная приповерхностная геология области представлена на рис. 4 (по Aylsworth и др., 1990).

* harris@NRCan.gc.ca.

"" Geological Survey of Canada contribution #20070170.

© 2007 EAGE

Экологическая и инженерная геофизика



Рисунок 1 Карта расположения NTS 66A - Schultz Lake, Nunavut, северо-западные области.

Экологическая и инженерная геофизика

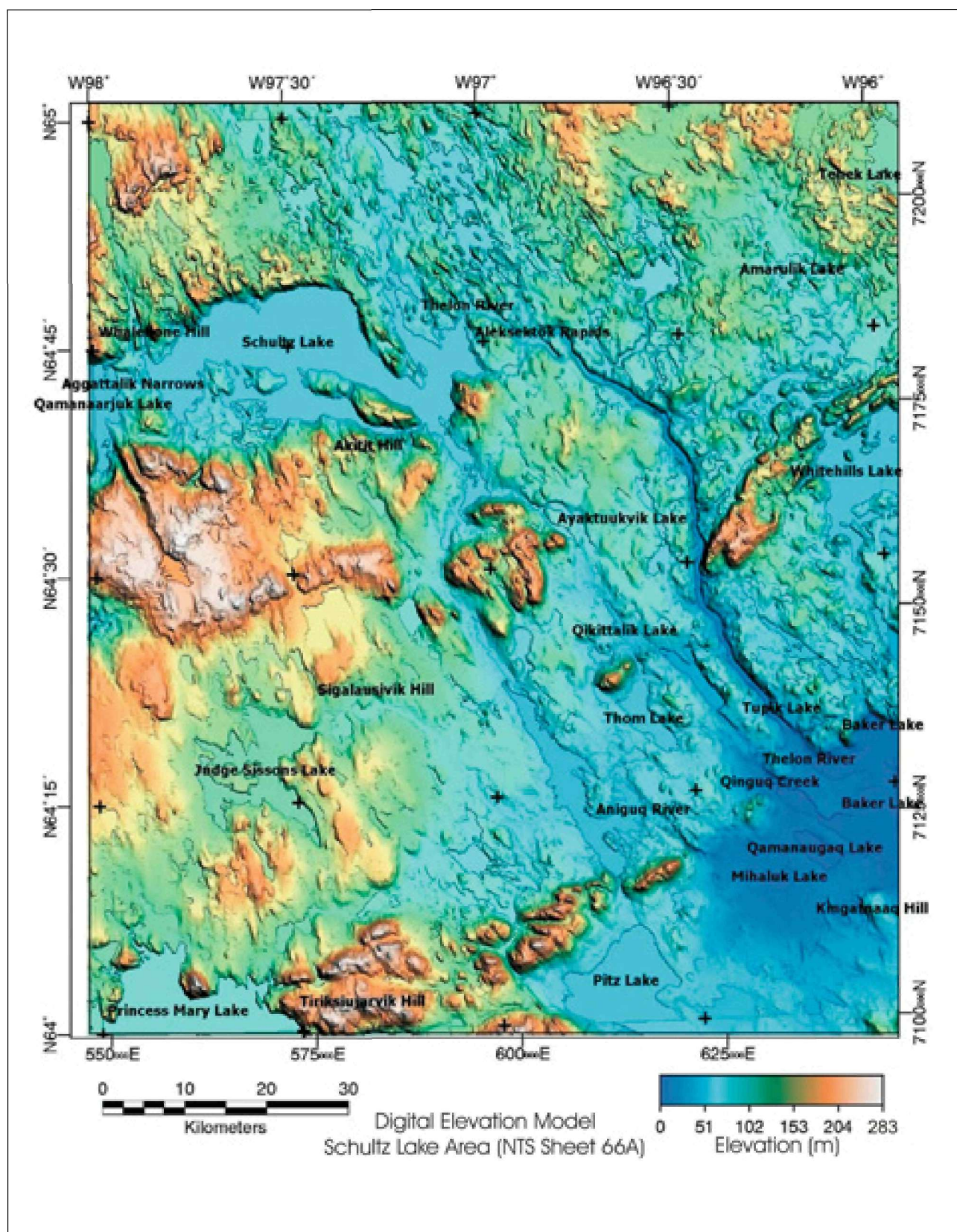


Рисунок 2 Цифровая модель превышений района Schultz Lake.

Экологическая и инженерная геофизика

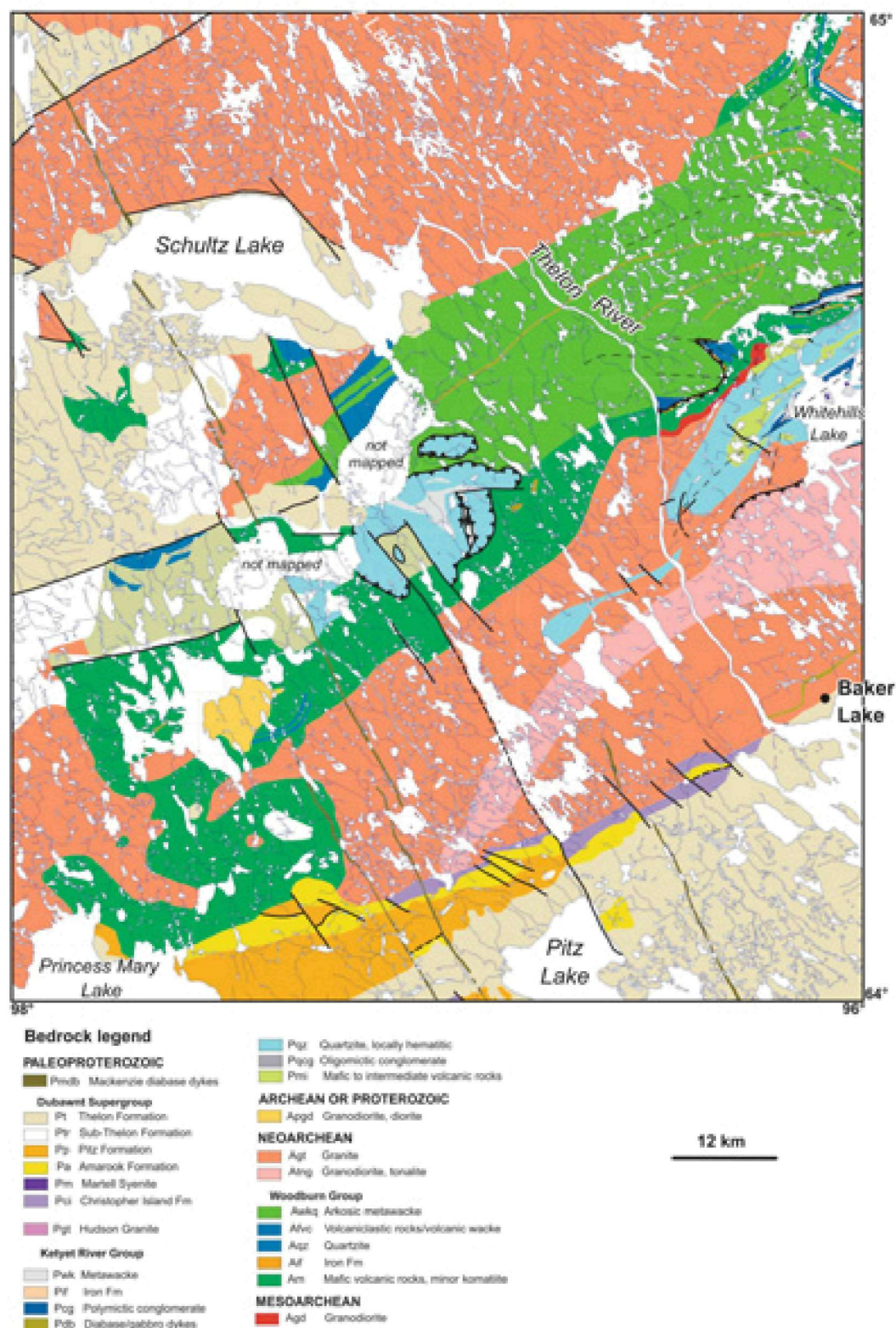


Рисунок 3 Геологическая карта коренных пород района Schultz Lake (по Hadlari и др., 2004).

Экологическая и инженерная геофизика

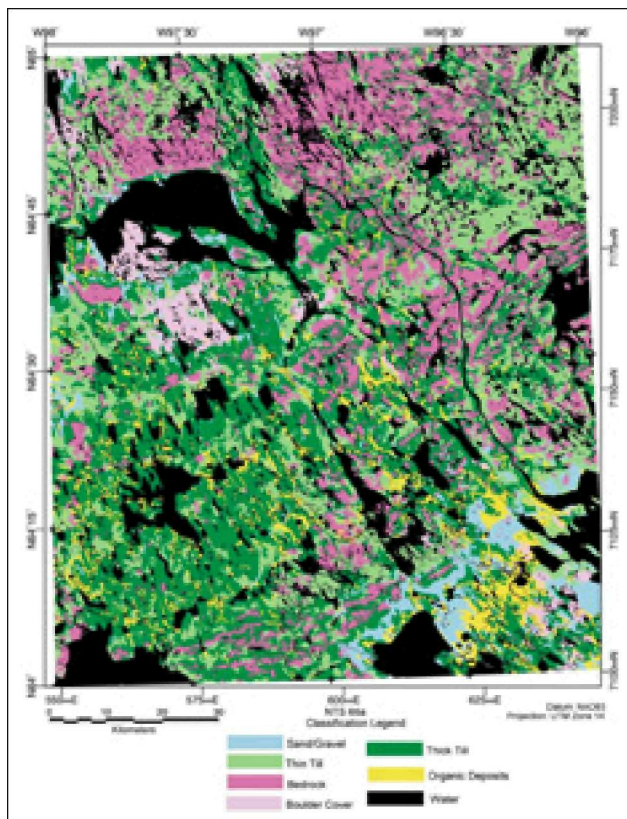


Рисунок 4 Генерализованная карта поверхностной геологии района Schultz Lake (измененная по Aylsworth et al., 1990).

МЕТОДИКА

Чтобы выявить приповерхностные породы в исследуемом районе были оценены два вида спутникового изображения по их возможностям: многолучевой RADARSAT-1 SAR (рис. 5) и LANDSAT 7 ETM+ (рис. 6). Для определения влияния различия значений высот над уровнем моря при картировании разнообразных приповерхностных комплексов был также использован DEM (рис. 2), полученный по Цифровым Данным Высот Канады (CDED) Национальной топографической базы данных.

Было использовано изображение по LANDSAT 7 ETM+ для выявления поверхностных пород, которые могут быть картированы на основании отражающих (спектральных) свойств в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра (полосы 1 (.45-.52(μm), 2 (.52-.60(μm), 3 (.63-.69(μm), 4 (.76-.90(μm), 5 (1.55-1.75(μm), и 7 (2.08-2.35(μm)). Чтобы выделить поверхностные структуры, которые имеют различные сигналы обратного рассеивания (такие как коренные породы, органические вещества, ледниковые отложения), были использованы изображения многолучевого SAR. Для создания изображения поверхности земли RADARSAT-1 спутниковые изображения использовали C-полосу (5.6 см). Используемые для этой цели геометрия бокового обзора и длинноволновый сигнал делают SAR очень чувствительным к вариациям поверхностной топографии, ее изрезанности и влажности.

В районе Schultz Lake поверхностная геологическая карта была визуально генерализована в 6 поверхностных типов (рис. 4), используя типы пород, определенные по данным дистанционной регистрации: 1) песок и гравий, 2)

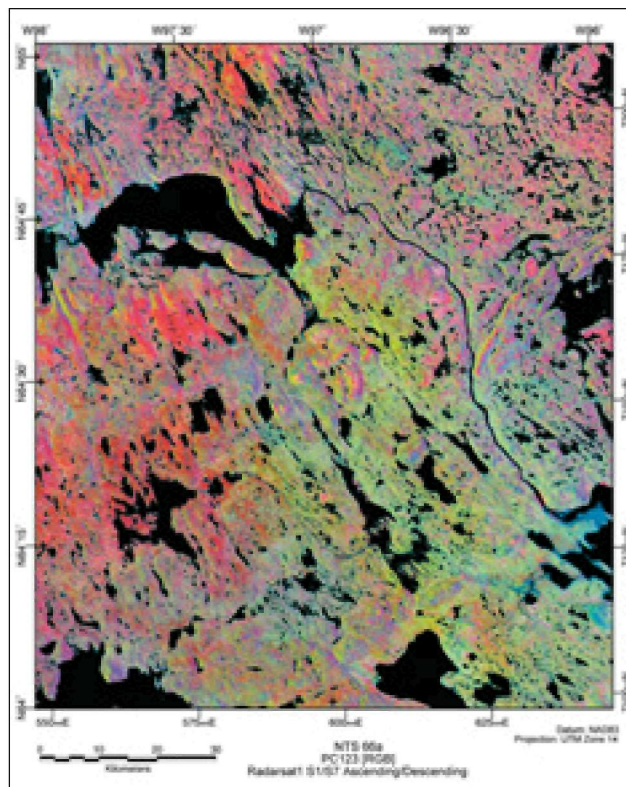


Рисунок 5 Первые три главные компоненты, полученные по изображению S1/S7 восходящее/нисходящее RADARSAT-1, показаны в виде трехцветной композиции (PC1 - R, PC2 - G, PC3 - B).

органические вещества, 3) слабо мощные покровы ледниковых отложений, 4) мощные ледниковые отложения, 5) коренные породы и 6) валунный покров. Области обучения, типичные для каждого генерализованного поверхностного вида, выбраны на основании анализа аэрофотоснимков в соответствии с полевыми измерениями и анализом спутникового изображения. Рис. 7 показывает области обучения, которые были использованы для предварительной сводной классификации. Была проведена классификация с эталонами, используя метод максимального правдоподобия (Richards и Jia, 1999) по различным комбинациям данных дистанционной регистрации, используя статистические методы для каждой группы, полученной по каждой области обучения. Классификация, использующая все области обучения, приведенные выше (без воды и облаков) (рис. 7) независимо проведена по данным LANDSAT 7 ETM+ и RADARSAT-1 и в комбинации друг с другом, а также с DEM. Предполагалось, что предварительные правдоподобия в классификации должны быть равными.

Результат всякой классификации с эталонами зависит от точности использованных данных для обучения. Если статистические методы для обучаемых областей неразделимы, точность классификации будет ниже, и результаты могут быть непредсказуемы и, возможно, введут в заблуждение. Один путь для определения специфического сигнала обучающих последовательностей заключается в вычислении статистики преобразованных расхождений (TD: transformed divergence statistic) и обсужден Richards и Jia (1999). Преобразованное расхождение является математическим методом для определения того, насколько (умеренное) разделение, а значения менее 1.0 показывают на слабое разделение.

Экологическая и инженерная геофизика

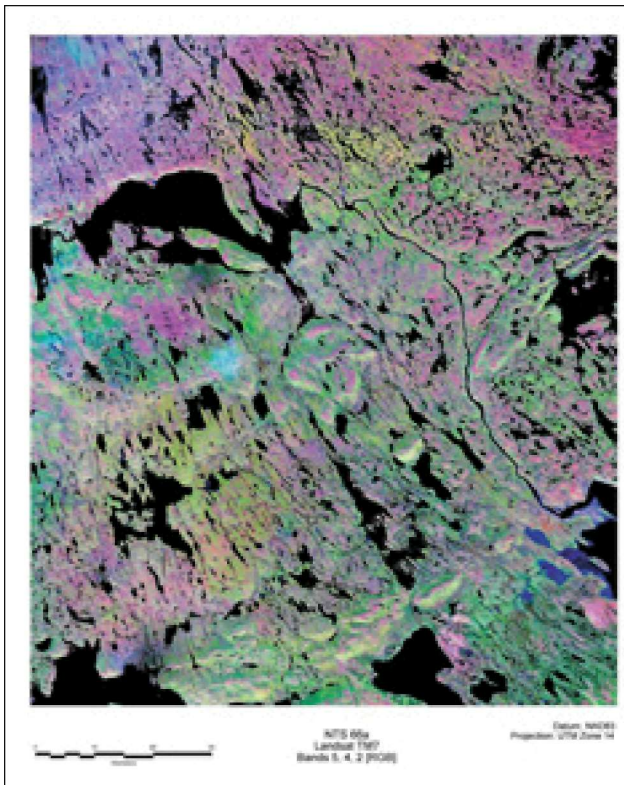


Рисунок 6 *LANDSAT TM7, цветное изображение полос 5, 4, 2 (красный, зеленый, голубой).*

хорошо разделяются классы в N-мерном пространстве. Значения преобразованного расхождения более 1.9 показывают хорошее статистическое разделение между классами, значения между 1.0 и 1.9 указывают среднее. Другой метод оценки статистического изменения областей обучения и, следовательно, погрешности результивных карт классификации заключается в перекрестной проверке. Из полной совокупности обучаемых областей (рис. 7) были отобраны три совокупности нерегулярно меняющихся областей обучения, используя признаки из данных RADARSAT-1, LANDSAT 7 ETM+, и DEM. Для получения самостоятельной классификации поверхностных комплексов по данным RADARSAT-1, LANDSAT 7 ETM+ и DEM была использована сеть каждой области обучения. Каждая классификация затем была взаимно проконтролирована по точности с другими сетями области обучения (подтверждающие или контрольные области), которые не были использованы для получения целевой классификации. Это принимается за оценку погрешности классификационной операции. Статистическое разделение между обучаемыми областями для изображений RADARSAT-1 (далее именуется как SAR) и LANDSAT 7 ETM+ (далее именуется как LANDSAT) является в лучшем случае умеренным, хотя полные данные LANDSAT предлагают немного лучшее разделение поверхностных типов, основанное на анализе TD обучаемых областей (рис. 8). Это особенно верно для органических веществ, тонких и мощных ледниковых отложений, песка и гравия (рис. 8g).

Однако, существует очень слабое различие в разделении между SAR и LANDSAT для коренных пород и крупных валунов. Самое лучшее разделение достигается для крупных валунов по LANDSAT и SAR, органических веществ по LANDSAT и мощных ледниковых отложений по LANDSAT; все они имеют значения TD, превышающие 1.4 (рис. 8g), что указывает на умеренное разделение и по LANDSAT, и по SAR (TD около 1.3). LANDSAT предлагает немного лучшую избирательность для всех типов, кроме крупных валунов, которые практически идентичны по SAR (рис. 8a-e), и,

90

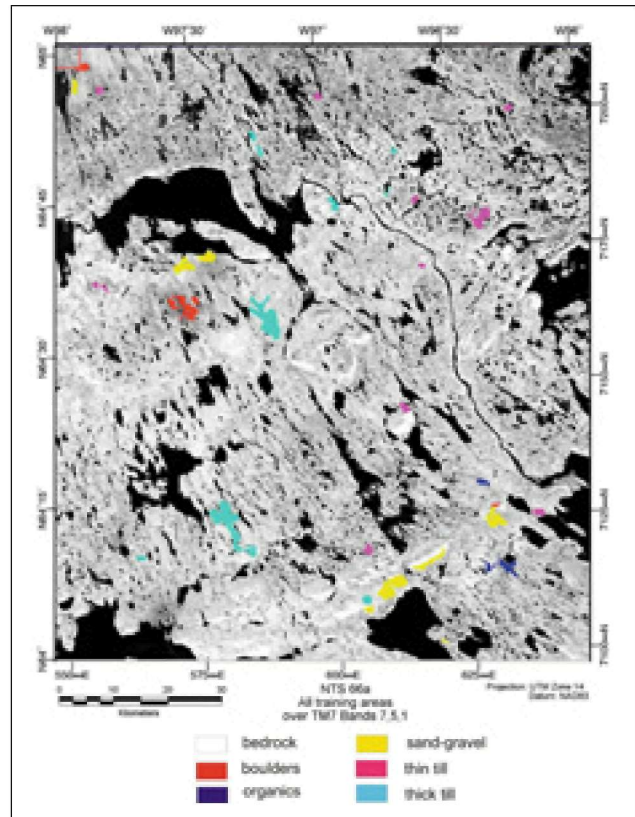


Рисунок 7. *Области обучения, использованные для классификации.*

главным образом, намного лучшее разделение слабо мощных ледниковых комплексов, кроме случая их совместного залегания с коренными породами и крупными валунами (рис. 8f). Отложения песка и гравия слабо различаются от отложений органического вещества и мощных и слабо мощных ледниковых отложений и по SAR, и по LANDSAT (рис. 8d), поскольку существуют области маломощных ледниковых отложений на коренных породах (только LANDSAT), органические вещества, песок и гравий (только SAR) (рис. 8f). В общих словах, любые значения ниже 1.0 на диаграммах TD (рис. 8) показывают слабое разделение между видами приповерхностных пород.

Результаты классификации

Рис. 9 представляет классификации, основанные на данных LANDSAT (рис. 9a), SAR (рис. 9b), LANDSAT и SAR (рис. 9c) и LANDSAT, SAR и DEM (рис. 9d). Карты подобны по внешнему виду, однако для оценки их подобия может быть использован более количественный показатель, основанный на комбинационной таблице категорий карты. Итоги этого анализа представлены в таблице 1 и на рис. 10.

Мощные ледниковые отложения показывают самую лучшую согласованность (46%) между картами SAR и LANDSAT, несмотря на то, что самое низкое соответствие приходится на органические вещества (13%) и крупные валуны (16%). Самое большое сходство между классифицированными картами существует между SAR /LANDSAT и SAR / LANDSAT / DEM, показывая, что DEM дает самый маленький вклад в разделение поверхностных пород.

Экологическая и инженерная геофизика

Относительно полной точности классифицированных карт, при сопоставлении с первичными областями обучения, использованными для классификации, SAR и LANDSAT имеют близкие точности (58 против 52% для LANDSAT и SAR, соответственно) (Таблица 2), показывающие, что спектральные характеристики и неровности рельефа обладают аналогичными возможностями распознавания поверхностных пород. Напротив, ни спектральная характеристика, ни характер неровностей рельефа по отдельности не достаточны для разделения поверхностных пород. Когда используются обе характеристики для классификации, достигается гораздо большая точность (70%), а когда добавляются данные DEM, точность возрастает почти до 80% (Таблица 2).

Поверхностные комплексы, которые плохо классифицируются по LANDSAT, включают коренные породы, песок-гравий и маломощные ледниковые отложения, в то время как крупные валуны, органические вещества и мощные ледниковые отложения точно классифицируются по отношению к областям обучения. Мощные ледниковые отложения и крупные валуны также достаточно точно классифицируются по данным SAR, хотя органические вещества плохо классифицируются. Для SAR и LANDSAT присутствует смешение между крупными валунами и коренными породами. Это можно предположить по спектральному сигналу (LANDSAT), так как обе эти категории, как предполагается, имеют похожие спектры. Меньшее смешение существует между этими комплексами по данным SAR, так как валунные поля связаны с более неровным рельефом поверхности по SAR. Участки распространения пород органического происхождения более точно классифицируются по LANDSAT по спектральной характеристике (поглощение, обусловленное водонасыщенными почвами), чем по различию в неровности рельефа или признакам вторичной влажности (диэлектрические свойства). Маломощные ледниковые отложения классифицируются неточно и по SAR, и по LANDSAT; даже когда они используются вместе, в лучшем случае они классифицируют этот комплекс с точностью немного выше 50%. Это указывает, что области маломощных

ледниковых отложений неоднородны и в спектральном отношении, и в отношении характера неровностей рельефа. Добавление данных DEM не увеличивает точность классификации мощных ледниковых отложений, кроме существенного различия в высотах над уровнем моря этих областей. Данные превышений в самой малой степени улучшают классификацию пород, выходящих на поверхность, так как эти области, характеризуются склонностью к более приподнятому рельефу.

Перекрестная проверка обучаемых областей

В таблице 3 три классификации, имеющие три различные сети областей обучения, отмечены как CV1, CV2, и CV3. Исходя из трех перекрестных проверок классификации, CV2 – самая точная с точностью сопоставления с областями обучения, использованными для получения классификации, 86%, затем CV3 с точностью 83% и CV1 с точностью 81%.

Коэффициенты «карра» – 0.81, 0.77 и 0.75 для CV2, CV3, и CV1, соответственно. Однако когда каждая классификация сопоставляется с проверяемой областью обучения (не используемой для создания карты классификации), точности в основном намного ниже (недиагональные элементы).

Средняя точность при сопоставлении классификаций с контрольными областями порядка 70%. Вариации средней точности (от самой низкой до самой высокой для каждого ряда в таблице 3) приблизительно 17%, представляющие, таким образом, погрешность классификации как функцию изменчивости значений для областей обучения. Это наводит на мысль, что определение областей обучения является решающим в процессе классификации. Наилучшие точности получены со смешением обучаемых областей (CV1 – Таблица 3).

Проблема перекрытия заключается в том, что даже с установлением характерных областей обучения поверхностные комплексы пород дали достаточно хорошую степень перекрытия, как показано анализом преобразованной дивергенции.

	SAR	LANDSAT	SAR + LANDSAT	SAR + LANDSAT + DEM
SAR		31.0 / .13	53 / .4	50 / .36
LANDSAT			62 / .52	51 / .39
SAR + LANDSAT				72 / .64
SAR + LANDSAT + DEM				

Таблица 1 Результаты сопоставления (перекрестная проверка) между картами классификации, показанными на рис. 9. Первое число в каждой ячейке показывает процентное соответствие, второе – коэффициент «карра».

	% точности	карра
SAR	52	.44
LANDSAT	58	.44
SAR + LANDSAT	70	.61
SAR + LANDSAT + DEM	79	.71

Таблица 2 Результаты точностей и коэффициентов «карра» для карт, приведенных на рис. 9. Карты сопоставляются с первичными областями обучения, использованными для классификации.

	CV1	CV2	CV3
CV1	81.4 (.75)	77.5 (.63)	87.1 (.79)
CV2	67.2 (.56)	86.3 (.81)	69.6 (.6)
CV3	65.7 (.55)	68.1 (.51)	83.6 (.77)

Таблица 3 Результаты точности классификации и коэффициентов «карра» (в скобках) по перекрестной

Экологическая и инженерная геофизика

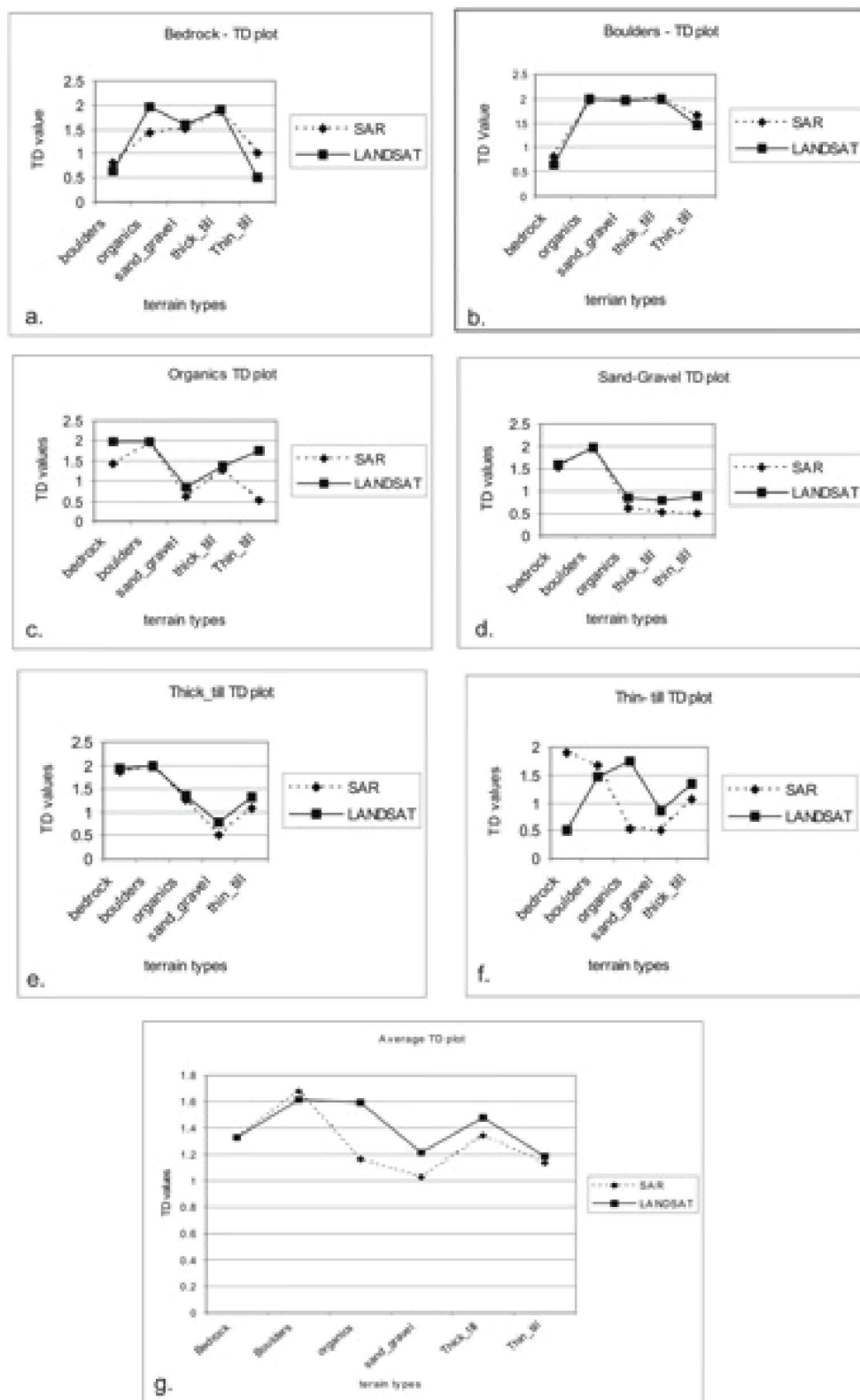


Рисунок 8 Диаграммы преобразованного расхождения (TD) для областей обучения (a), коренных пород (b) валунов (c), органического материала (d), песка-гравия, (e) мощных ледниковых отложений, (f) маломощных ледниковых отложений, (g) среднее TD.

Экологическая и инженерная геофизика

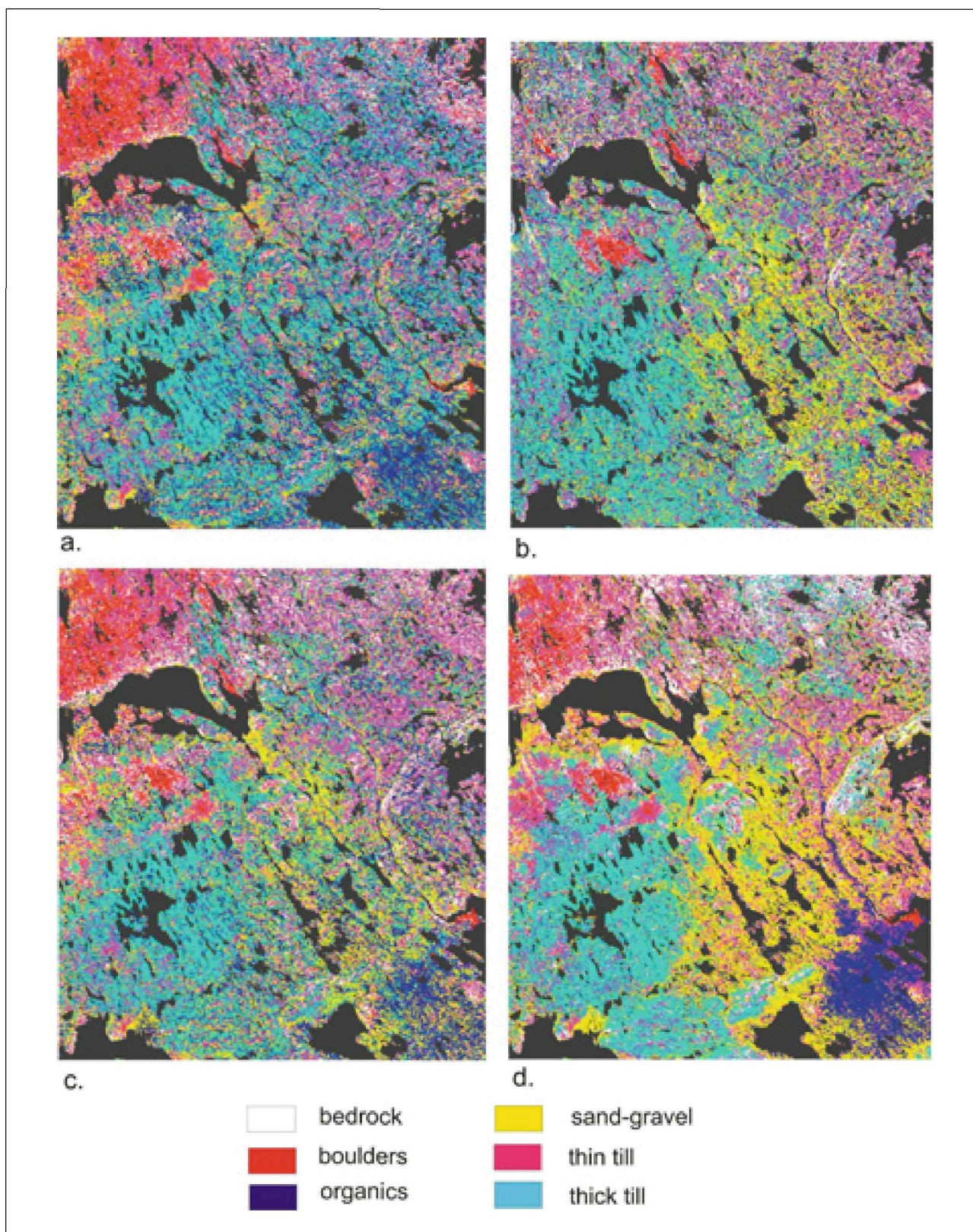


Рисунок 9 Классификации по методу максимального правдоподобия (a) LANDSAT, (b) RADARSAT, (c) LANDSAT и RADARSAT, (d) LANDSAT, RADARSAT, и DEM.

Экологическая и инженерная геофизика

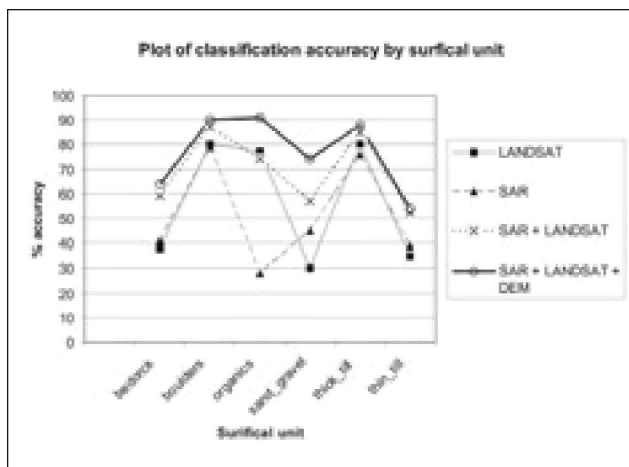


Рисунок 10 Диаграмма точности классификации, основанной на сравнении карты, построенной по LANDSAT, RADARSAT, и DEM и областей обучения для каждого типа поверхностных пород.

Обсуждение

Польза изображений, полученных дистанционными методами регистрации, для прогнозного картирования поверхностных пород повышается при совместном использовании спутниковых изображений RADARSAT и LANDSAT. Важно отметить, что использование комбинации неоднородностей рельефа и спектральных характеристик помогает лучше различить поверхностные породы, чем при использовании одного признака. Однако изображения SAR и LANDSAT показали различные значения смещения на картах классификации. Изображения SAR не могут легко отличить коренные породы от маломощных ледниковых отложений, в то время как оптическое изображение не может различить коренные породы и валунные поля. В первом случае, неровности поверхности коренных пород схожи с неровностями маломощной толщи ледниковых отложений, в то время как во втором случае спектральные свойства коренных пород очень похожи на таковые валунных полей. Классификация органических отложений, использующая SAR, смешивается с отложениями песок/гравий и мощными ледниковыми отложениями, которые имеют похожие неровности рельефа. LANDSAT намного лучше при классификации органических отложений, основанной на особом спектральном сигнале, обусловленном растительностью и высоким содержанием влаги. И SAR, и LANDSAT могут успешно классифицировать мощные ледниковые отложения из-за их характерной неоднородности рельефа и спектральных характеристик (обусловленных растительностью), которые полностью отличаются от таковых для других пород. Классификация маломощных ледниковых отложений по SAR или оптическим изображениям часто смешивается с коренными породами и или выходами на поверхность маломощных ледниковых отложений, так как изменяющиеся неоднородности рельефа и спектральные характеристики похожи для всех трех поверхностных типов (маломощные ледниковые отложения, мощные ледниковые отложения, коренные породы), и вероятнее всего, они неоднородны по природе и постепенно смешиваются с коренными породами и мощными ледниковыми отложениями в широкой переходной зоне. Сочетание SAR и LANDSAT дает в результате более эффективную классификацию с меньшим перекрытием и ошибками. Коренные породы, валунные поля, органические

отложения и мощные ледниковые отложения имеют более низкое значение смещения, а ошибки пропуска или слияния классов уменьшаются, когда для классификации комбинируются два типа изображения. Различие между отложениями песок/гравий и маломощными ледниковыми отложениями было немного увеличено по отношению к разделительной способности SAR и оптического изображения.

Добавление цифровой модели превышений привело в результате к более высокой степени точности классификации (рис. 10). Это проявляется в высоких классификационных отметках для коренных пород, маломощных ледниковых отложений и мощных ледниковых отложений, эффект превышений которых в некоторой степени контролирует положение характерных комплексов. Текстурные и спектральные характеристики пород связаны с превышением следующим образом. Области самых высоких превышений обычно характерны для выходов на поверхность коренных пород, которые являются специфическими по их спектральным и текстурным свойствам. Породы между верхней границей морских переработанных пород и выходящими на поверхность коренными породами дают текстуры и спектральные сигналы от органических пород, пород маломощных и мощных ледниковых отложений. Породы под верхней границей морских переработанных отложений дают спектральный сигнал аналогичный породам, залегающим выше морской границы, но имеют измененную текстуру, которая является результатом морской переработки.

Выводы

Классификация форм в районе Schultz Lake (NTS 66A) показала, что изображения RADARSAT-1 и LANDSAT 7 TM+ имеют возможности для классификации определенных поверхностных пород. Комбинирование SAR и LANDSAT позволяет использовать и неровности рельефа поверхности, и спектральные свойства для классификации поверхностных пород; и результаты точности классификации выше, чем, когда каждый тип данных используется поодиночке. Классификация по восходящим/нисходящим изображениям RADARSAT-1 S1/S7; по 1, 2, 3, 4, 5, 7 полосам LANDSAT 7 ETM+ и цифровой модели превышений области дает в результате различно выглядящие классификационные карты (рис. 9) и варьирующие точности классификации (Таблица 2). Выбор областей обучения играет важную роль в процессе классификации с эталонами. Как показано в Таблице 2, изменчивость на отобранном полигоне области обучения приведет в результате к различиям в точности классификации.

Перекрестная проверка, проведенная в этом исследовании, контролирует обоснованность выбранных для классификации областей обучения и позволяет оценить эффективность (погрешность) классификации, основанной на выбранных обучаемых областях (~17% в этом исследовании). Процедура классификации, приведенная в этой работе, представляет метод картирования обширных областей, где неоднородности рельефа поверхности и спектральные свойства различны. Эта методика облегчает создание карт, на которых поверхностные породы могут быть предсказаны с определенной степенью достоверности (погрешности). Эти карты могут быть использованы для планирования проведения полевых работ (выбора района проведения полевых работ), или как базовые карты поверхностных пород в областях, где последующие полевые работы не возможны.

Экологическая и инженерная геофизика

Литература

- Aylsworth, J. M., Cunningham, C. M., and Shilts, W. W. [1990] Surficial Geology, Schultz Lake, District of Keewatin, Northwest Territories. *Geological Survey of Canada, Preliminary Map*, 43-1989.
- Grunsky, E.C. [2002] The application of principal components analysis to multi-beam RADARSAT-I satellite imagery: A tool for land cover and terrain mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28, 6, 758-769.
- Grunsky, E.C., Harris, J.R., and McMartin, I. [2006] Predictive mapping of surficial materials, Schultz Lake area (NTS 66A), Nunavut, Canada. *Geological Survey of Canada Open File SIS3*.
- Hadlan, T, Rainbird, R.H., and Perhsson, S.J. [2004] Geology, Schultz Lake, Nunavut; *Geological Survey of Canada, Open File 1839, scale 1:250,000*.
- Lowman, P.D., Harris, J., Masuoka, P.M., Singhroy, V.H., and Slaney, V.R. [1987] Shuttle imaging Radar (SIR-B) Investigations of the Canadian Shield: Initial Report. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-25, 55-66.
- McMartin, I., Dredge, L.A., and Robertson, L. [2005] Ice flow maps and datasets: Schultz Lake (NTS 66A) and Wager Bay (NTS 56G) areas, Kivalliq Region, Nunavut; *Geological Survey of Canada, Open File 4926* (1 CD-ROM).
- McMartin, I. and Dredge, L.A. [2005] History of ice flow in the Schultz Lake (NTS 66A) and Wager Bay (NTS 56G) areas, Kivalliq Region, Nunavut. GSC Current Research Paper 2005-B2.
- Richards, J.A. and Jia, X. [1999] *Remote sensing digital image analysis, An Introduction*. (Third, Revised and Enlarged Edition), Springer-Verlag, New York. 363 pp.
- StatGraphics [2000]. *Statgraphics Plus 5.0*. Manugistics, Rockville, Maryland, USA.