

Б.К. Рахимжанов* , Д. Т. Тулеукулова 

АО «Национальная компания «Қазақстан Ғарыш Сапары», Казахстан, г. Астана

*e-mail: rahimzhanovberik@gmail.com

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО ПОКРОВА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА РАДАРНОЙ ПОЛЯРИМЕТРИИ

Роль снеготаяния имеет огромную роль в весенний период, когда проходят перепады температур, а вместе с ними превращение снега в воду. Процесс таяния проходит за несколько дней. При резком потеплении, быстрое таяние снега может привести к обильному прохождению паводков. В Казахстане последние десятилетия паводки имеют ущербы республиканского значения и считаются крупномасштабными. Знание параметров и характеристик снежного покрова, а также предсказание и моделирование прохождения паводков существенно важно для предотвращения масштабных катастроф. Применение данных дистанционного зондирования Земли, в особенности изучения снежного покрова в течение многих лет, позволило дать оценку точности прохождения паводков. В Казахстане в последнее десятилетие увеличилась температура воздуха в среднем на 1-4 °C в связи с чем, наблюдались прохождения обильных паводков в регионах Центрального и Северного Казахстана. Немаловажным фактором при моделировании прохождения паводков учитывается фактор впитываемости (инфильтрации) воды мерзлой почвой. Анализ данных по мерзлой почве в основном проводят путем наземных и полевых, а также лабораторных исследований. Данная статья посвящена проведению ретроспективного анализа оптических и радарных снимков, с целью выявления участков уплотнения снежного покрова и появления наледи над почвой. По оптическим снимкам в весенний период отобраны участки с предположительной характеристикой подтаивания. Далее, по радарным снимкам на указанные участки скачены разные комбинации поляризации VH-VV, VV-VH, VV, HH, на которые проведен анализ регрессионной зависимости отображения сигнала на темных и светлых участках снимка. Анализ, проведенный в работе, показывает разные участки рассеивания, где наблюдается разность состава снега и содержания льда в составе. Однако, данный метод не позволяет сделать анализ глубины промерзания почвы.

Ключевые слова: оптические и радарные снимки, комбинация поляризации, толщина снежного покрова.

B.K. Rakhimzhanov*, D.T. Tuleukulova

JSC "NC "Kazakhstan Gharysh Sapary", Kazakhstan, Astana

*e-mail: rahimzhanovberik@gmail.com

Calculation of snow cover characteristics using the method of radar polarimetry

The role of snowmelt is of great importance in the spring, when temperature drops pass, and with them the transformation of snow into water. The melting process takes several weeks. With a sharp warming, the rapid melting of snow can lead to abundant floods. In Kazakhstan, in recent decades, floods have caused damage of republican significance and are considered large-scale. Knowing the parameters and characteristics of the snow cover, as well as predicting and modeling the passage of floods, is essential for preventing large-scale disasters. The use of Earth remote sensing data, in particular the study of snow cover over many years, made it possible to assess the accuracy of the passage of floods. In Kazakhstan, in the last decade, the air temperature has increased by an average of 1-4 C. In this regard, the cases of heavy floods in the regions of Central and Northern Kazakhstan was observed. An important factor in modeling the passage of floods is the factor of water absorption (infiltration) by frozen soil. The analysis of data on frozen soil is mainly carried out by ground and field, as well as laboratory studies. This article is devoted to a retrospective analysis of optical and radar images in order to identify areas of snow cover compaction and the appearance of ice over the soil. According to optical images in the spring, areas with a presumable characteristic of icing were selected. Further, various combinations of polarization VH-VV, VV-VH, VV, HH Sentinel 2 Satellite were downloaded from radar images to these areas, for which an analysis of the regression dependence of the signal display in dark

and light areas of the image was carried out. The analysis carried out in the work shows different areas of dispersion, where there is a difference in the composition of snow and ice content in the composition. However, this method does not allow to analyze the depth of soil freezing.

Key words: optical and radar images, polarization combination, snow cover thickness.

Б.К. Рахимжанов*, Д.Т. Тулеукулова

«Қазақстан Ғарыш Сапары» ұлттық компаниясы» АҚ, Қазақстан, Астана қ.

*e-mail: rahimzhanovberik@gmail.com

Радарлық поляриметрия әдісін қолдана отырып, қар жамылғысының сипаттамаларын есептеу

Көктемде қар еруінде және онымен бірге қардың суға айналуы кезінде температураның төмендеуінің рөлі үлкен. Қар еру процесі бірнеше аптаға созылады. Күрделі жылыну кезінде қардың тез еруі мол су тасқынына әкелуі мүмкін. Қазақстанда соңғы онжылдықтарда су тасқыны республикалық маңызы бар зиян келтіріп, ауқымды болып саналады. Қар жамылғысының параметрлері мен сипаттамаларын білу, сондай-ақ су тасқынының өтуін болжау және модельдеу ауқымды апаттардың алдын алу үшін өте маңызды. Жерді қашықтықтан зондтау деректерін пайдалану, атап айтқанда, көп жылдар бойы қар жамылғысын зерттеу су тасқынының өтуінің дәлдігін бағалауға мүмкіндік берді. Қазақстанда соңғы онжылдықта ауа температурасы орта есеппен 1-4 С-ға көтерілді. Осыған байланысты Орталық және Солтүстік Қазақстан облыстарында қатты су тасқынының өтуі байқалды. Су тасқынының өтуін модельдеудің маңызды факторы – мұздатылған топырақтың суды сіңіру (инфильтрация) факторы. Мұздатылған топырақ туралы мәліметтерді талдау негізінен жердегі және далалық, сондай-ақ зертханалық зерттеулермен жүзеге асырылады. Бұл мақала қар жамылғысының тығыздалу аймақтарын және топырақ үстіндегі мұздың пайда болуын анықтау үшін оптикалық және радарлық ғарыштық түсірілімдерді ретроспективті талдауға арналған. Көктемдегі оптикалық суреттерге сәйкес, қардың еріп мұзданған жерлерін болжамды сипаттамасы бар аймақтар таңдалды. Әрі қарай Sentinel 2 ғарыш аппаратының VH-VV, VV-VH, VV, HH поляризациясының әртүрлі комбинациялары осы аймақтарға радарлық түсірілімдер жүктелді, ол үшін түсірілімнің қараңғы және жарық аймақтарындағы сигнал дисплейінің регрессияға тәуелділігіне талдау жүргізілді. Жұмыста жүргізілген талдау дисперсияның әр түрлі аймақтарын көрсетеді, мұндағы композициядағы қар мен мұз құрамының айырмашылығы бар. Бірақ бұл әдіс топырақтың қату тереңдігін талдауға мүмкіндік бермейді.

Түйін сөздер: оптикалық және радиолокациялық кескіндер, поляризация комбинациясы, қар жамылғысының қалыңдығы.

Введение

Измерение таяния снега является важнейшим фактором при оценке воздействия изменения климата на водные ресурсы. Традиционные методы измерения таяния снега включают наземные наблюдения, которые могут быть дорогостоящими и отнимать много времени. Однако радиолокационные данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) стали эффективным и экономичным способом измерения таяния снега. Технология ДЗЗ использует радиолокационные импульсы для сбора данных о поверхности Земли. Собранные данные могут помочь исследователям понять, как меняются плотность снега и содержание воды по мере таяния снега. Эта информация позволяет точно измерить скорость таяния снега. Радиолокационные данные ДЗЗ могут собираться на обширных территориях, что позволяет измерять таяние снега во всех регионах. Это жизненно важно для понима-

ния последствий изменения климата для водных ресурсов, что в свою очередь используется для планирования управления водными ресурсами и принятия решений.

Объектом данного исследования послужил анализ космических снимков среднего пространственного разрешения на участок зоны интереса Центрального региона Казахстана, в период с конца зимнего периода, при наличии ледостава рек, по весенний период, до начала паводков. В настоящее время существуют различные методы анализа космических снимков (Baktybekov, 2020; Rakhimzhanov, 2019; Duisenbai, 2018). Данные дистанционного зондирования Земли были взяты с открытых источников с сайтов (Веб сайт USGS; Веб сайт European Space Centre). Климатические данные были взяты с открытых источников сайта (Веб сайт метеоданных).

Выбор космических снимков на зону интереса осуществлялся, исходя из погодных условий за 2021 год. На территорию Центрального

Казахстана по оптическим снимкам Sentinel визуально выбраны участки, где по тепловым каналам в результате потепления 10 марта до +2°C, имели предположительную характеристику подтаивания. В связи с тем, что в зимне-весенний период проходит обильное таяние и на оптических снимках появляется облачность,

были выбраны и скачаны радарные снимки со спутника европейского производства Sentinel-1B, Sentinel-2B, с сайта <https://scihub.copernicus.eu/>.

Анализ погодных явлений производился исходя из климатических условий, согласно открытым данным, за март 2021 г. (Таблица 1).

Таблица 1 – Погода в г. Караганда в марте 2021 г.

Дни недели/ дата	Пн/ 01.03.2021	Вт/ 02.03.2021	Ср/ 03.03.2021	Чт/ 04.03.2021	Пт/ 05.03.2021	Суб/ 06.03.2021
Температура	0°	-7°	-13°	-5 °	-7 °	-5 °
Дни недели/ дата	Вс/ 07.03.2021	Пн/ 08.03.2021	Вт/ 09.03.2021	Ср/ 10.03.2021	Чт/ 11.03.2021	Пт/ 12.03.2021
Температура	-4°	0°	-11 °	+2 °	-4 °	-12 °
Дни недели/ дата	Суб/ 13.03.2021	Вс/ 14.03.2021	Пн/ 15.03.2021	Вт/ 16.03.2021	Ср/ 17.03.2021	Чт/ 18.03.2021
Температура	-22 °	-16°	-15°	-15 °	-12 °	-7°
Дни недели/ дата	Пт/ 19.03.2021	Суб/ 20.03.2021	Вс/ 21.03.2021			
Температура	0 °	0 °	+1°			

Выбор эталонных снимков имеет решающее значение в зависимости от температуры. Температура должна быть ниже 0 градусов Цельсия, чтобы быть уверенным, что в снежном покрове нет воды в жидком состоянии (Fung, 1994).

Материалы и методы

Радарные снимки на первом этапе были скачаны с сайта. Далее, снимки загружаются в специализированное программное обеспечение для обработки космических снимков Sentinel-1 Toolbox, куда входит программный комплекс SNAP (Sentinel Application platform), разработанный Европейским космическим агентством прежде всего для работы со снимками Sentinel. В данном ПО снимки проходят геометрическую, радиометрическую предобработку, с использованием продуктов калибровки, устранения шумов снимка, геометрическая обработка, геометрическая привязка снимков, получение цветного композита снимков. Полученный RGB композит помогает провести более детальный анализ и усиливает дешифрируемость зон интереса (Liu, 2021).

К предварительно обработанным снимкам применен метод анализа разности отображе-

ния поляризации сигнала на радиолокационных снимках космического аппарата Sentinel 1B на уровне GRDH, в виде продукта Sigma 0. Sigma 0 – коэффициент рассеяния, или обычная мера силы радиолокационных сигналов, отраженных распределенным рассеивателем, обычно выражается в дБ. Это нормализованное безразмерное число, сравнивающее наблюдаемую силу с ожидаемой для площади в один квадратный метр (Веб портал, European Space Centre). Sigma 0 определяется относительно номинально горизонтальной плоскости и, как правило, имеет значительные различия в зависимости от угла падения, длины волны и поляризации, а также от свойств самой рассеивающей поверхности.

Следующий этап работы заключался в анализе регрессионной зависимости отображения сигнала на темных и светлых участках снимка в комбинации поляризации VH-VV, VV-VH, VV, HH. Предположение о разности отображения радиолокационного сигнала на светлых и темных участках радиолокационного снимка основан на предположении о разности коэффициента обратного рассеяния на сухом и ранее подтаявших участках снега. Коэффициент обратного рассеяния заснеженной местности может состоять

из прямых вкладов, полученных в результате (Ulaby, 1986; Fung, 1994):

А) обратного рассеяния от взаимодействия снег-воздух;

Б) объемного рассеяния от слоя снега;

В) обратного рассеяния от подстилающей поверхности земли;

Д) косвенных влияний, возникающих в результате взаимодействия волн между объемными неоднородностями и границей раздела снег-грунт.

Результаты и обсуждение

Заснеженный рельеф рассматривается как неоднородный слой над однородным полупространством. В данной работе рассматривались механизмы рассеяния заснеженной местности в виде: А) обратное рассеяние от взаимодействия снег-воздух, Б) объемное рассеяние от слоя снега и В) обратное рассеяние от подстилающей поверхности земли

Согласно анализа оптических снимков, были выбраны тепловые каналы, для просмотра кар-

тины теплового следа подтаивания в результате повышения температуры до $+2^{\circ} 10$ марта 2021г. Маска теплового канала сделана по снимку T42UYA_20210315T061631_B08, где канал B08 (NIR – ближний инфракрасный) – составляет 832 нм, GSD -10 метров.

В программном обеспечении QGIS загружены итоговые полученные снимки, на которые предварительно наложены маски тепловых каналов, с помощью которых определялись участки с талой воды. На рисунке 1 темно-синим цветом показан участок, где имеется структура неоднородностей по радиолокационным сигналам, т.е. предполагаемая талая вода или вода, на примере г. Караганды, вблизи ТЭЦ-3. Тепловой след верифицирован на участках с талой водой вблизи техногенных источников. На основании данной маски также выявлены участки таяния.

В том числе, на снимке T42UYA_20210315T061631_B11 использовался короткий инфракрасный канал (shortwave infrared), длина волны 1613.7 нм, GSD20 метров.

Определена площадь предположительного подтаивания (Рисунок 2).

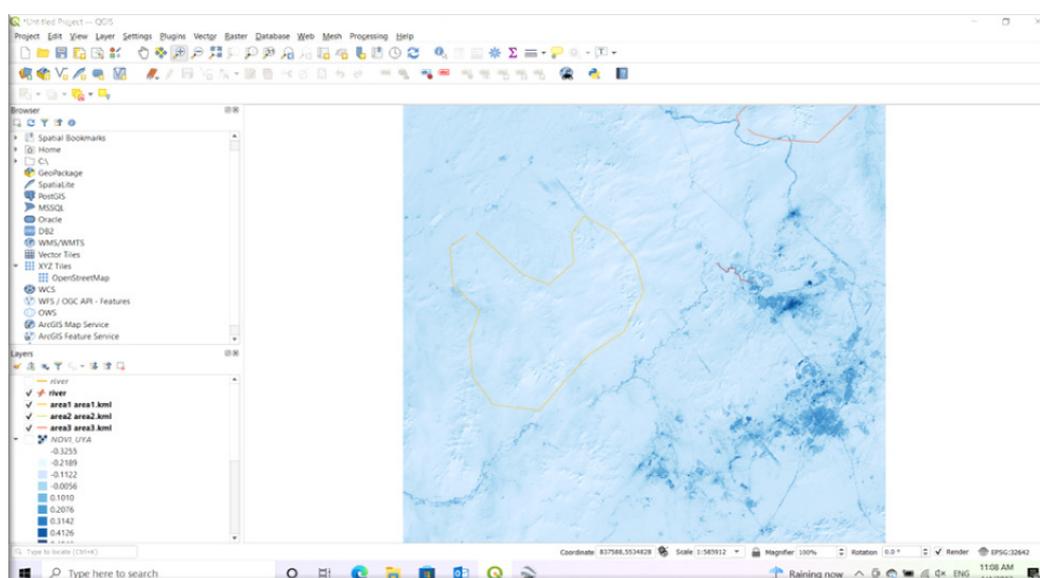


Рисунок 1 – Участок вблизи ТЭЦ -3, г. Караганда

Наряду с оптическими снимками, производилась обработка радарных снимков с генерацией неоднородностей по горизонтальной и вертикальной поляризации HV-VV Sentinel-1B, С диапазона уровня обработки GRBD на дату 16 марта 2021 года. С помощью поляриметричес-

ких данных удалось получить полную матрицу рассеяния и подробную информацию о геометрической структуре и диэлектрических свойствах каждого пикселя (Van, 1987).

Из данной поляризации сгенерирована маска с окраской по палитре Sigma 0 (Рисунок 3).

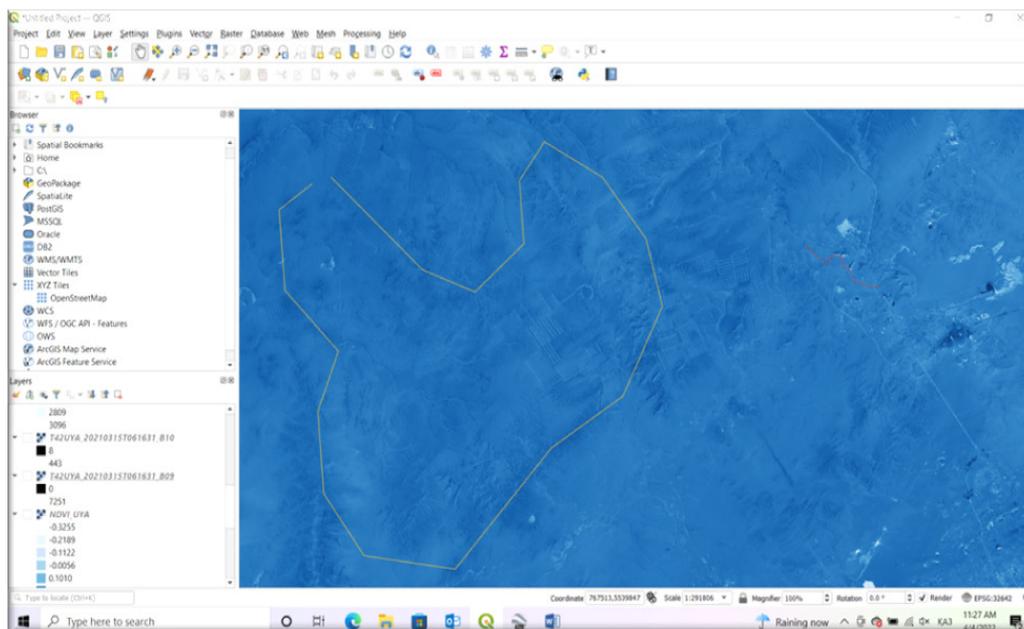


Рисунок 2 – Предложительный участок подтаивания

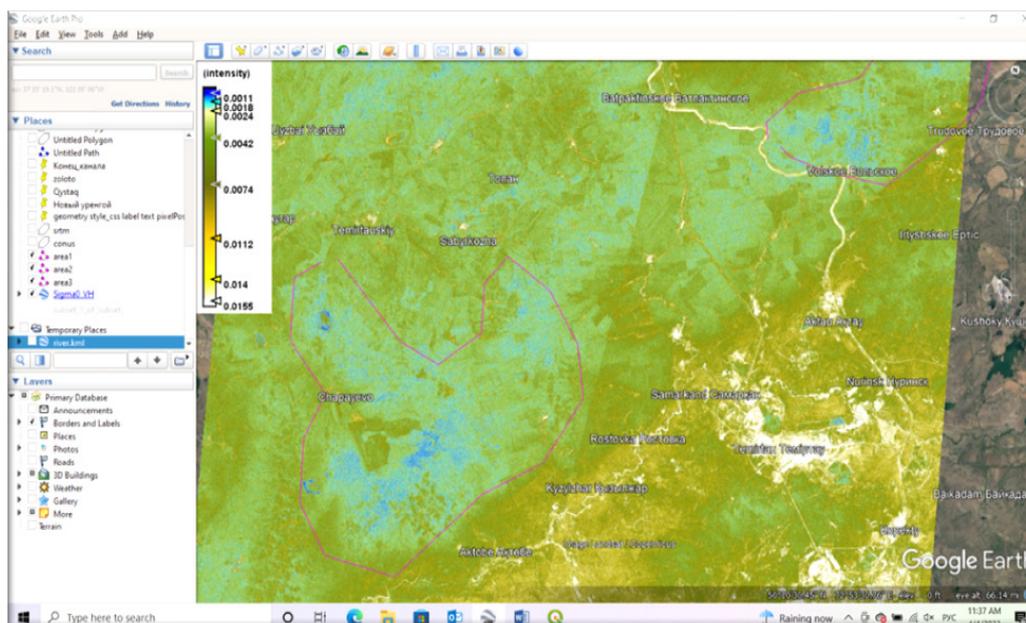


Рисунок 3 – Сгенерированная маска по Sigma 0

В виду того, что температура последующие дни колебалась с положительных на отрицательные, на маске обозначены участки, напоминающие промёрзшие участки, в дальнейшем данные участки изучены на цифровой модели SRTM DEM (Shuttle radar topography mission digital elevation model) для исключения эффекта рельефа. Сравнивая участки полигона по SRTM,

установлено, что данный участок интереса расположен в низовье, с указанием отметки 0,0011. Анализ отображения разнородного участка показывает совпадение участка низовьев рельефа и участка концентрации однородного участка отражения на радиолокационном снимке.

Далее, для выяснения разнородности отражения радиолокационных волн в зависимости от

поляризации сигнала, был сделан анализ поляриметрического совмещения вертикальной и горизонтальной поляризации радиолокационных снимков С-диапазона.

Согласно регрессионной модели ретроспективного анализа проделанных работ, результатом послужило спектральное отображение рассеивания волн. На поляриметрических радарных снимках отображаются более темные участки, предположительно с более плотным снегом с

содержанием льда, участки со светлым отображением участки снежного покрова без обледенения.

На рисунке 4, точками фиолетового цвета указаны случайные участки для регрессионного анализа комбинации вертикальной и горизонтальной поляризации. График регрессии показывает высокое значение рассеивания радарного сигнала в комбинации двух поляризации на темных участках на снимке.

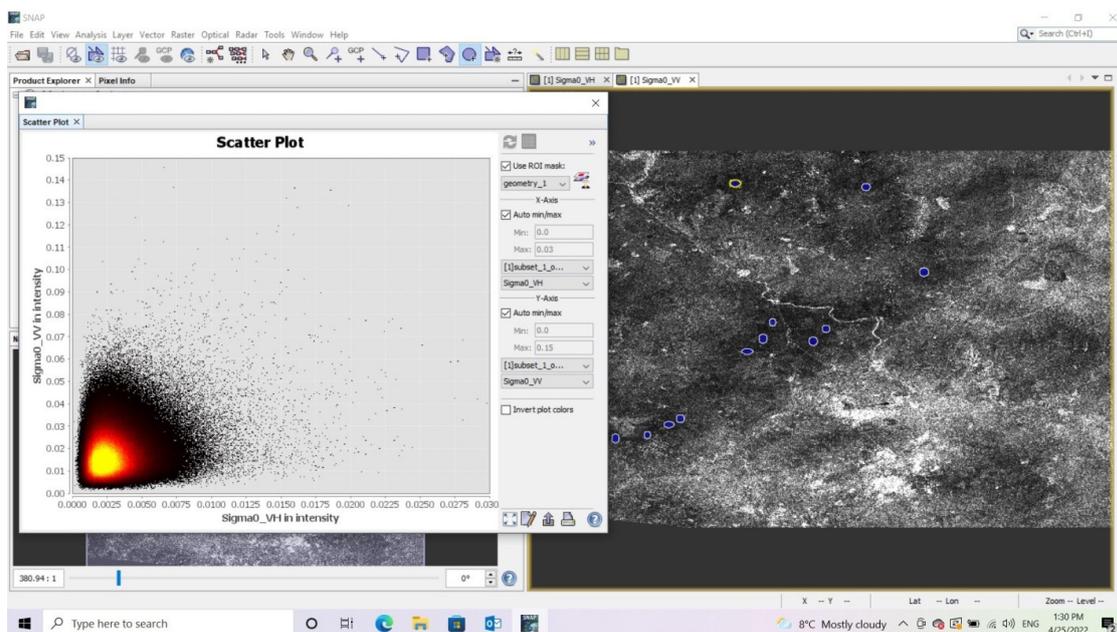


Рисунок 4 – Регрессионная зависимость рассеивания радиоволн поляризации VH-VV (вертикальная – горизонтальная, вертикальная – вертикальная) на темных участках

Далее, данное же отображение было применено для участков со светлым отражением на снимке.

На рисунке 5 отображаются более светлые участки на снимке, предположительно менее плотный снег с низким содержанием льда. Точки фиолетового цвета на рисунке показывают точки выборки для регрессионного анализа.

Как видно, в данном случае коэффициент рассеивания ниже по сравнению с более темными участками, данное обстоятельство обусловлено наличием сухого состава снежного покрова, которая дает более однородную картину рассеивания.

С целью исключения ошибок самой регрессионной модели были использованы выборки на светлые и темные участки одновременно, то есть в регрессионный график введены и светлые

и темные участки (Рисунок 6). График регрессии отображает, что при совместной регрессии светлых и темных участков, график взаимоисключает рассеивание, то есть данные взаимоисключают друг друга, что отображает разность состава поверхности и различие значения отражения сигнала.

Данная ситуация вызвана тем, что разнородные участки поверхности, такие как участки обледенения на рыхлом снеге, могут быть отображены при совмещении горизонтальной и вертикальной поляризации на разные участки в отдельности. Разность отображения в виде рассеивания отображенных радиолокационных волн является признаком разнородности, в данном случае наличие или отсутствие участков обледенения на рыхлом снежном покрове.

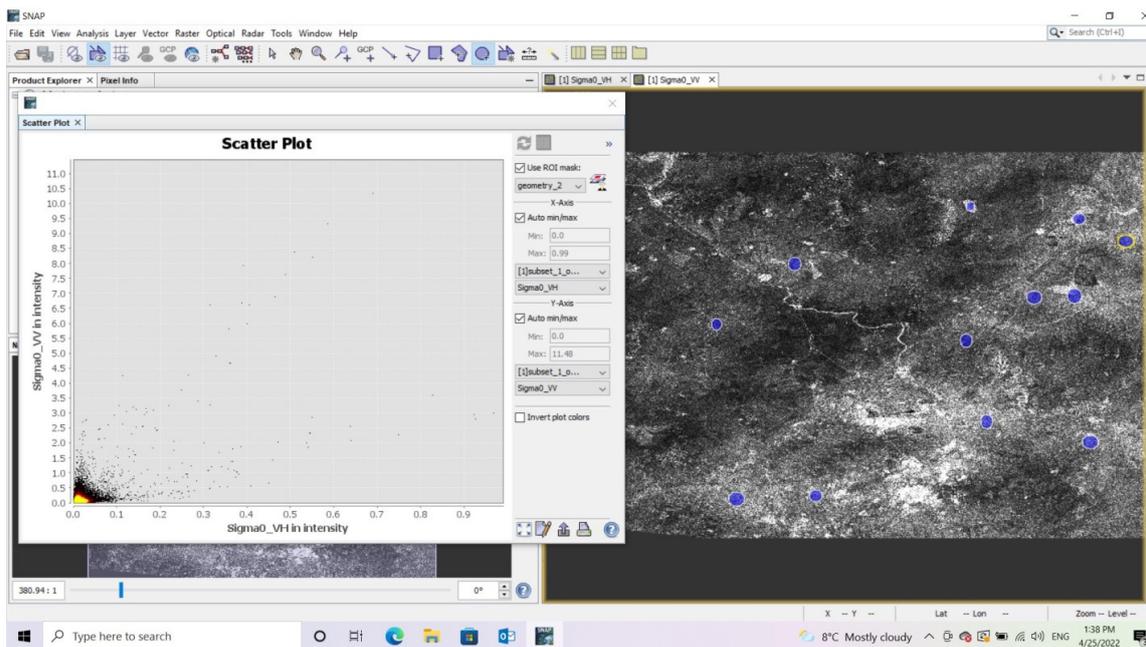


Рисунок 5 – Регрессионная зависимость рассеивания радиоволн поляризации VH-VV (вертикальная – горизонтальная, вертикальная – вертикальная)

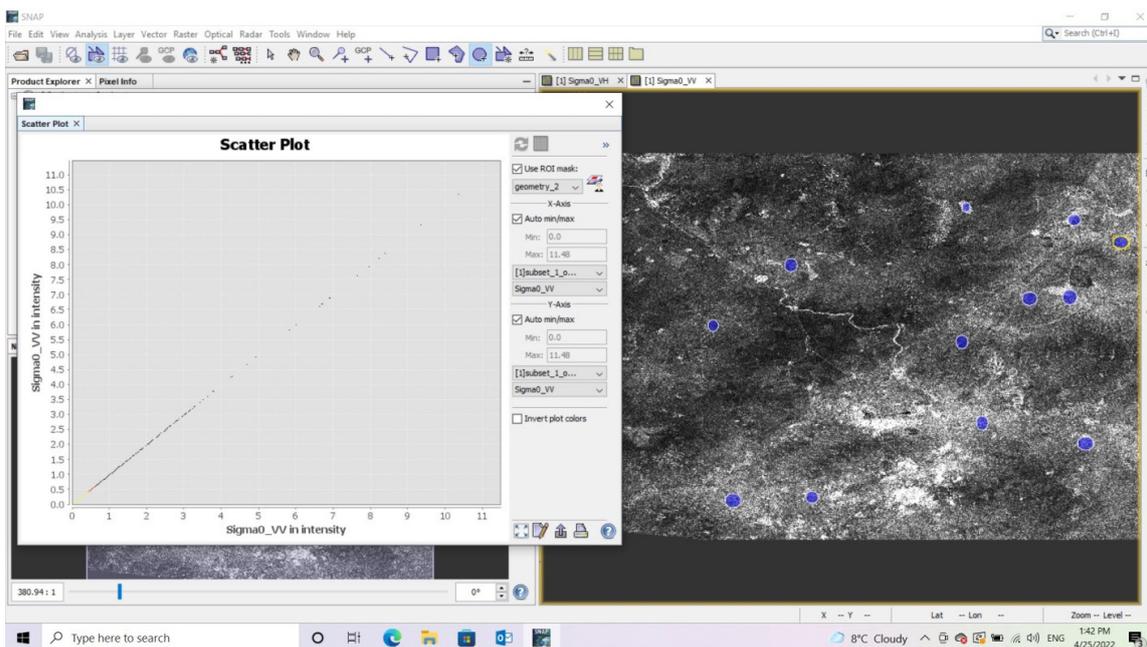


Рисунок 6 – Регрессионная зависимость рассеивания радиоволн поляризации H-H, VH-VV (горизонтальная – горизонтальная, вертикальная – горизонтальная, вертикальная- вертикальная)

Исходя из вышесказанного, очевидно что, для измерения разности отображения радиолокационных волн на разных участках поверхности, необходимо рассчитать комбинацию разных

поляризаций, что требует необходимость использования как минимум двух пар четырех поляризации для отображения разности отражения сигнала на разных участках снимка.

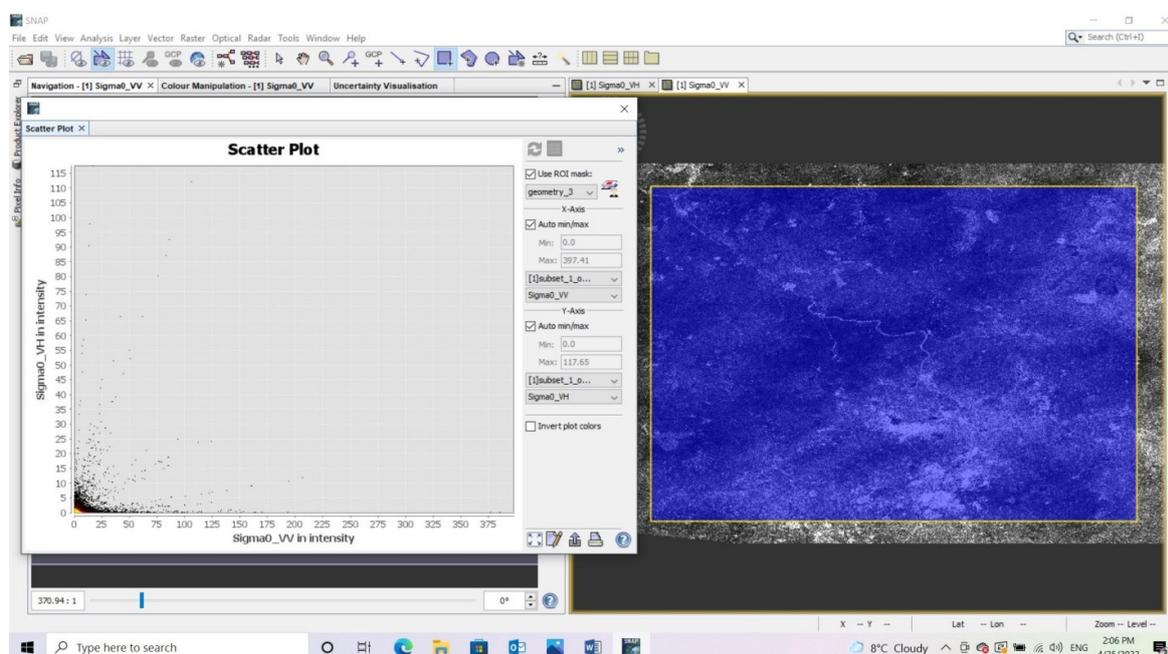


Рисунок 7 – Общий вид отображения рассеивания радиоволн, коэффициент рассеивания менее выраженный

На рисунке 7 отображена генеральная совокупность отраженного сигнала вертикальной и горизонтальной поляризации радиолокационных волн С-диапозона. График отображает наличие участков рассеивания и их концентрацию на небольших участках, то есть рассеивание не имеет равномерного распределения по всему снимку, что могло бы свидетельствовать о низкой статистической значимости рассеивания, следовательно имеются участки высокого рассеивания, сконцентрированные на определенных участках. Дополнительные данные по температуре поверхности на оптических снимках и анализ рельефа изучаемых участков дополнительно подтверждают высокую вероятность того, что участки обледенения имеют большее рассеивание сигнала, что указывает на подтаявшие участки в конкретном месте.

Заключение

В последние годы таяние снега стало важнейшей экологической проблемой с далеко

идущими последствиями для водных ресурсов, сельского хозяйства, экосистем и человеческого общества. Точный и своевременный мониторинг таяния снега необходим для управления этими воздействиями, а также для прогнозирования и смягчения последствий стихийных бедствий, таких как наводнения, оползни и лавины. Технологии ДЗЗ, в частности оптические и радиолокационные данные, превратились в мощные инструменты для измерения таяния снега на больших площадях и на длительные периоды времени (Chen, 2021).

Исследования возможности и ограничения оптических и радиолокационных данных ДЗЗ для измерения таяния снега позволило получить более полную картину динамики таяния снега. Факторами, наиболее влияющие на измерение по снимкам, оказались тип снега, рельеф местности, облачный покров и временное разрешение, температурный режим (Das, 2021). Оптические снимки, чувствительные к облачным покровам, позволили отобразить характер таяния, по сравнению с радарными, на которых четко отслежи-

вался временной отрезок таяния несмотря на облачный покров. Однако, необходимо учесть, что радарные данные более худшего качества чувствительны к влиянию рельефа местности. Интеграция оптических и радиолокационных данных позволяет комплексно решать проблемы, повысить точность измерений, в особенности в сложных участках, где снежный покров неоднороден (Lei, 2019).

По результатам сравнительного анализа оптических и радарных данных можно сделать следующее заключение:

1) Наблюдается совпадение участков неоднородностей между маской σ_0 , отображающей неоднородность отражения радиолокационного сигнала в комбинации горизонтальной и вертикальной поляризации радиолокационных волн С-диапозона (Sentinel 1B) и участков неоднородностей теплового канала на длинах волн 1613.7 нм (по каналам B11, Sentinel 2A);

2) Анализ метеоданных за 1, 8, 10 марта 2021 года, выявляет факты перепадов температур, по которым можно сформировать участки таяния с дальнейшим промерзанием;

3) Полученные маски дают возможность сделать предположение о наличии участков с подтаянием, где в дальнейшем с понижением температуры произошло промерзание участков;

4) Анализ цифровой модели рельефа показывает отрицательные значения высоты на участках таяния, что допускает возможность скапливания тающих потоков в низовьях;

5) Полученные результаты могут быть использованы для анализа участков уплотнения снежного покрова и появления наледей над почвой или появления участков плотного обледенения снежного покрова;

6) Регрессионный анализ комбинированного отображения вертикальной и горизонтальной поляризации радарной поляриметрии на темных и светлых участках снимка показывает более высокий уровень рассеивания на темных участках снимка и меньший уровень рассеивания на светлых участках снимка, что может отображать разность состава снега и содержания льда в составе снега что дает большой разброс разнонаправленного рассеивания радиоволн;

7) Метод не позволяет сделать анализ глубины промерзания почвы.

Благодарность

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR10965352).

Литература

- Baktybekov K.S., Aimbetov A., Rakhimzhanov B.K., Murat A. Modeling of flood inundation for Zhabay River Basin in Central Kazakhstan Region. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2020, 17(1), pp. 157–162. <https://doi.org/10.31489/2020NO1/157-162>
- Chen, Y., Zhang, Y., Wu, R., Sheng, Y., & Hu, X. (2021). Remote sensing of snow cover and snowmelt runoff in the upper Heihe River Basin using MODIS and Sentinel-1 data. *Remote Sensing*, 13(6), 1156.
- Das, S., Mishra, A. K., & Oinam, B. B. (2021). Estimating snowmelt runoff using remote sensing data: A review. *Journal of Hydrology*, 595, 126019.
- Duisenbai N., Baktybekov K., Aimbetov A., Tulekulova D., Rakhimzhanov B. Development and implementation of scientific based methodology of predicting and modeling of flood and inundation using kazeosat-1, 2 space craft remote sensing datas. *International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2018, 18(1.5), pp. 253–258.
- Fung A., *Microwave scattering and emission models and their applications*, Artech House, 573 p. 1994;
- Irshad, F., Malik, J., Khalil, R.M.Z. Mapping wet snow using sar c-band through google earth engine. 6th International Conference on Aerospace Science and Engineering, ICASE 2019, 9059160. <https://doi.org/10.1109/ICASE48783.2019.9059160>
- Liu, C., Li, Z., Zhang, P., Wu, Z. A Method for Mapping Snowmelt Extent with Multitemporal Radar Data. *SAR in Big Data Era, BIGSAR DATA 2021-Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/BIGSAR DATA53212.2021.9574168>
- Lei, Y., Li, X., Li, J., Li, H., & Cui, X. (2019). Snowmelt monitoring in the northeastern Tibetan Plateau using the Sentinel-1 SAR
- Nagler, T., Rott, H., Ripper, E., Bippus, G., Hetzenecker, M. Advancements for snowmelt monitoring by means of Sentinel-1 SAR. *Remote Sensing*, 8(4), 348. 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8040348>
- Rakhimzhanov B.K., Murat A., Shaikhova G.N. Flood estimation for Zhabay River Basin in Akmola region. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1391(1), 012168. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1391/1/012168>
- Ulaby F., Moore R. and Fung A., *Microwave remote sensing, active and passive*, Vol. III. Reading, Addison Wesley, 1986.
- Van Zyl J.J., Zebker H.A. and Elachi C., *Imaging radar polarization signatures: Theory and observation*, *Radio Sci.*, vol. 22, 4, pp. 529-543, 1987.
- Web portal about the available data source of USGS, USA, <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Web portal open data of European Space Centre <https://scihub.copernicus.eu/>

Web portal about the open meteo data <https://world-weather.ru/pogoda/kazakhstan/karaganda/march-2021/>

Web portal European Space Centre <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/definitions>.

References

Baktybekov K.S., Aimbetov A., Rakhimzhanov B.K., Murat A. Modeling of flood inundation for Zhabay River Basin in Central Kazakhstan Region. Eurasian Physical Technical Journal, 2020, 17(1), pp. 157–162. <https://doi.org/10.31489/2020NO1/157-162>

Chen, Y., Zhang, Y., Wu, R., Sheng, Y., & Hu, X. (2021). Remote sensing of snow cover and snowmelt runoff in the upper Heihe River Basin using MODIS and Sentinel-1 data. *Remote Sensing*, 13(6), 1156.

Das, S., Mishra, A. K., & Oinam, B. B. (2021). Estimating snowmelt runoff using remote sensing data: A review. *Journal of Hydrology*, 595, 126019.

Duisenbai N., Baktybekov K., Aimbetov A., Tuleukulova D., Rakhimzhanov B. Development and implementation of scientific based methodology of predicting and modeling of flood and inundation using kazeosat-1, 2 space craft remote sensing datas. International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2018, 18(1.5), pp. 253–258.

Fung A., Microwave scattering and emission models and their applications, Artech House, 573 p. 1994;

Irshad, F., Malik, J., Khalil, R.M.Z. Mapping wet snow using sar c-band through google earth engine. 6th International Conference on Aerospace Science and Engineering, ICASE 2019, 9059160. <https://doi.org/10.1109/ICASE48783.2019.9059160>

Liu, C., Li, Z., Zhang, P., Wu, Z. A Method for Mapping Snowmelt Extent with Multitemporal Radar Data. SAR in Big Data Era, BIGSAR DATA 2021-Proceedings. <https://doi.org/10.1109/BIGSAR DATA53212.2021.9574168>

Lei, Y., Li, X., Li, J., Li, H., & Cui, X. (2019). Snowmelt monitoring in the northeastern Tibetan Plateau using the Sentinel-1 SAR

Nagler, T., Rott, H., Ripper, E., Bippus, G., Hetzenecker, M. Advancements for snowmelt monitoring by means of Sentinel-1 SAR. *Remote Sensing*, 8(4), 348. 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8040348>

Rakhimzhanov B.K., Murat A., Shaikhova G.N. Flood estimation for Zhabay River Basin in Akmola region. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1391(1), 012168. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1391/1/012168>

Ulaby F., Moore R. and Fung A., Microwave remote sensing, active and passive, Vol. III. Reading, Addison Wesley, 1986.

Van Zyl J.J., Zebker H.A. and Elachi C., Imaging radar polarization signatures: Theory and observation, *Radio Sci.*, vol. 22, 4, pp. 529-543, 1987.

Web portal about the available data source of USGS, USA, <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Web portal open data of European Space Centre <https://scihub.copernicus.eu/>

Web portal about the open meteo data <https://world-weather.ru/pogoda/kazakhstan/karaganda/march-2021/>

Web portal European Space Centre <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/definitions>.