

Санкт-Петербургский государственный университет

ШИРШОВА Вера Юрьевна

Выпускная квалификационная работа

МОНИТОРИНГ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УРБАНИЗИРОВАННЫХ РАЙОНАХ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.03 «Картография и геоинформатика»

ВМ.5523 «Геоинформационное картографирование»

Научный руководитель:

профессор СПбГУ

Нико Джованни

Рецензент: к.г.н., начальник ФГБУ

«Северо-Западное УГМС»

Цепелев Валерий Юрьевич

Санкт-Петербург

2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УРБАНИЗИРОВАННЫХ РАЙОНАХ И МЕТОДОВ ИХ МОНИТОРИНГА	6
1.1 Типы и причины оседаний земной поверхности в урбанизированных районах	6
1.2 Современные методы мониторинга оседаний земной поверхности	15
ГЛАВА 2. МИРОВОЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	21
2.1 Основные принципы и характеристика радиолокационного зондирования Земли 21	
2.2 Принципы радиолокационной интерферометрии	24
2.3 Методы интерферометрической обработки	27
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УРБАНИЗИРОВАННЫХ РАЙОНАХ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ SENTINEL 1	39
3.1 Общие сведения о КА Sentinel 1 и его сенсорах	39
3.2 Интерферометрическая обработка методом мультитременного DInSAR	43
3.3 Апробация метода	50
ГЛАВА 4. МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УРБАНИЗИРОВАННЫХ РАЙОНАХ	52
4.1 Динамика оседаний земной поверхности на южной части города Санкт-Петербург 52	
4.2 Методические рекомендации по проведению мониторинга предложенным методом	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	61
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	63
Интернет источники	67
ПРИЛОЖЕНИЕ №1	69
ПРИЛОЖЕНИЕ №2	70
ПРИЛОЖЕНИЕ №3	73

ВВЕДЕНИЕ

Еще 70 лет назад ученые считали, что оседания земной поверхности — это естественный природный процесс и человек не имеет к нему никакого отношения, т.к. данное явление связано преимущественно с геологическими процессами. Сейчас стало очевидным — человеческое вмешательство приводит к куда большим негативным последствиям. И это не преднамеренное совершение вредоносных действий, а последствия достижения других целей.

Наиболее значительное действие на земную поверхность оказывают добыча твердых полезных ископаемых, откачка флюидов (воды, нефти и газов), создание водохранилищ и строительство в городах высотных зданий. Исследования показали, что по частоте проявления, скоростям и негативным последствиям антропогенное воздействие превосходит естественные тектонические движения. Так откачка подземных вод в Мехико вызвала оседание города более чем на 8,5 м, а в приморских японских городах — со скоростью от 1 до 50 см в год и достигло местами 4 м. Строительство крупных городов с нагрузкой высотных и промышленных зданий также порождает опускание земной поверхности. В Москве, например, скорость опускания 1–2 мм/год (Разумов, 1991).

В последние десятилетия оседание земной поверхности стало широко распространенным явлением, его изучением и борьбой с ним заняты многие ученые и инженеры, оно стало международной проблемой, обсуждаемой на научных симпозиумах. Необходимость постоянного и тщательного мониторинга данного процесса является необходимой задачей каждой страны и мира в целом.

За смещениями в промышленных территориях обычно ведутся наблюдения традиционными геодезическими методами. Но сейчас они уходят на второй план в виду своей дороговизны и уступают место аэрокосмическим наблюдениям. Однако, такому тщательному мониторингу подвергаются территории горнодобывающих работы и места проведения ремонтной деятельности и строительства, а причин оседания земной поверхности в урбанизированных районах довольно много и не всегда очевидны места их появлений. В таком случае дистанционное зондирование Земли представляет собой надежный инструмент для глобального мониторинга, с помощью которого возможно предотвратить риски возникновения чрезвычайных ситуаций.

Наибольшее развитие и популярность получил метод радиолокационной спутниковой интерферометрии. Он представляет собой эффективное средство определения смещений земной поверхности и деформаций сооружений. Радиолокационная интерферометрия — активно развивающаяся в последние два десятилетия отрасль дистанционного зондирования Земли. Ее сущность заключается в излучении

искусственным спутником Земли радиосигнала, который, отражаясь от земной поверхности, регистрируется сенсором. Значение в каждой точке поверхности с некоторой дискретностью в плане будет содержать значение амплитуды и задержки по фазе. По произошедшим за время между первой и повторной съемками изменениям судят о вертикальных и горизонтальных смещениях земной поверхности. При этом отражающими поверхностями могут служить как искусственные (крыши зданий, развилки дорог), так и природные объекты (почвенный покров, растительность и др.).

Большинство известных алгоритмов определения зон оседания земной поверхности разработаны на основе данных коммерческих радиолокационных спутников и поэтому обеспечить глобальный мониторинг данного процесса, например, в России представляется дорогостоящим. Целью магистерской выпускной квалификационной работы является предложение методики мониторинга урбанизированных территорий на предмет оседаний земной поверхности методом радиолокационной спутниковой интерферометрии на основе находящихся в открытом доступе данных радиолокационной съёмки Sentinel-1.

Достижение сформулированной цели предусматривает выполнение следующих этапов работы:

- 1) определить причины оседаний в урбанизированных районах;
- 2) ознакомиться с существующими методами мониторинга оседаний;
- 3) изучить принципы радиолокационной спутниковой интерферометрии;
- 4) выбрать метод мониторинга оседаний земной поверхности;
- 5) апробировать метод на нескольких урбанизированных территориях;
- 6) разработка методики обработки радиолокационных данных с целью получения мест оседаний земной поверхности;
- 7) сформировать методические указания по мониторингу и автоматизированному картографированию оседаний земной поверхности методом радиолокационной спутниковой интерферометрии.

Для разработки системы мониторинга были выбраны европейские радиолокационные спутники близнецы семейства Sentinel – 1A и 1B данные, с которых свободно распространяются. Обработка и постобработка проводилась в открытом программном обеспечении SNAP, разрабатываемом европейским космическим агентством (ESA), и QGIS.

Данная выпускная квалификационная работа состоит из четырех глав. В первой главе освещены геологические и антропогенные причины оседаний в урбанизированных территориях, а также рассмотрены существующие их способы мониторинга. Во второй главе уделяется внимание теории и истории радиолокационных спутниковой

интерферометрии и существующим методами обработки. Третья глава посвящена спутникам Sentinel 1 и разработке методики мониторинга оседаний. В четвертой главе проведена верификация на примере города Санкт-Петербург и даны методические рекомендации по выполнению мониторинга предложенным алгоритмом. В заключении подведены итоги проделанной работы и рассмотрены возможные перспективы развития.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УРБАНИЗИРОВАННЫХ РАЙОНАХ И МЕТОДОВ ИХ МОНИТОРИНГА

1.1 Типы и причины оседаний земной поверхности в урбанизированных районах

Оседание земной поверхности, может быть, определено, как постепенное и/или постоянное опускание рельефа до более низкого уровня по причине подземного движения горных пород и грунтов.

Оседания являются одной из глобальных проблем в мире. Например, в Соединенных Штатах Америки более 44 тыс. км² в 45 штатах, площадь которых примерно равна размеру Нью-Гемпшира и Вермонта вместе взятых, пострадали от проседаний. Нередки провалы почвы наблюдаются и в России. Наиболее известными являются провалы в городе Березняки Пермского края. Большая часть города находится над соляной шахтой. В 2006 году было принято решение затопить рудник. Поступавшая в соляную шахту вода растворяла соль, образуя полость. Таким образом, земля города начала обрушаться в пустое пространство. В столице Канады Оттаве под землю провалилась часть улицы Ридо-стрит. Происшествие повлекло за собой утечку газа, отключение электроэнергии и ряд других коммунальных проблем (Провалы почвы..., 2019). Основными причинами являются уплотнение системы водоносных горизонтов, осушение органических почв, подземная добыча, гидроуплотнение, естественное уплотнение, провалы в грунтах и оттаивание многолетней мерзлоты. Более 80% выявленных оседаний являются следствием эксплуатации подземных вод. Также растущее освоение земельных и водных ресурсов угрожает усугубить проблемы оседания грунта. Во многих районах, которые располагаются на растворимых породах, таких как известняк, гипс или соль, оседание поверхности является обычным экологическим следствием человеческой деятельности в сфере землепользования и водопользования (Holzer, 1991).

Наиболее распространенный тип внезапного обрушения происходит из-за эрозии подземных грунтов и/или горных пород, вызванных протеканием искусственных канализационных труб или водопроводных сетей. Это редко разрушает населённые пункты, данное явление характерно для территорий, расположенных близ шоссе и междугородних трасс (Баринов А. В. и др., 2009).

Второй наиболее распространенный тип внезапного оседания земной поверхности происходит из-за растворения карбонатных пород (известняка).

Опасные для жизни и деятельности людей смещения чаще всего вызваны спадом уровня грунтовых вод, возникающим из-за перекачивания или отклонения поверхностного

стока или потока грунтовых вод через водопроницаемые породы. Хотя особенности обвалов, как правильно, сильно локализованы, они могут вносить загрязняющие вещества в систему водоносного горизонта и, таким образом, оказывать продолжительное региональное воздействие. Особенности обвалов, как правило, связаны с определенными гидрогеологическими свойствами пород, которые делают их предрасположенными к образованию полостей. Деятельность человека может способствовать образованию поверхностных полостей в этих предрасположенных горных породах и спровоцировать их разрушение, а также разрушение ранее существовавших подповерхностных полостей.

Процессы, способствующие возникновению оседаний, можно разделить на две группы по причинам возникновения (Zeitoun, Wakshal, 2013):

- геологические причины;
- антропогенные причины.

1.1.1 Геологические причины оседания грунта

Если рассматривать затронутые деятельностью человека земли, то можно отметить, что подземная добыча составляет около 30%. Большая часть из них связана с подземной добычей угля. Оседание подземных угольных выработок развивается, как постепенные деформации шахт. Как правило, это не связано с деятельностью подземных вод. Соль и гипс, соответственно, почти в 7500 и в 150 раз более растворимы, чем известняк. Подземные соляные и гипсовые рудники также участвуют в процессах деформации покрывающих их пород, так как эти эвапоритовые минералы подвержены быстрому растворению водой. Кроме того, образование известняка часто связано с последующим появлением провалов грунтов.

Растворение карбоната и карстовые процесс

Карбонатные породы, такие как известняк, состоящие в основном из минерального кальцита, очень чувствительны к растворению подземными водами в процессе химического выветривания (рис. 1). Такое растворение может привести к карстовым процессам (Максимович, 1963).

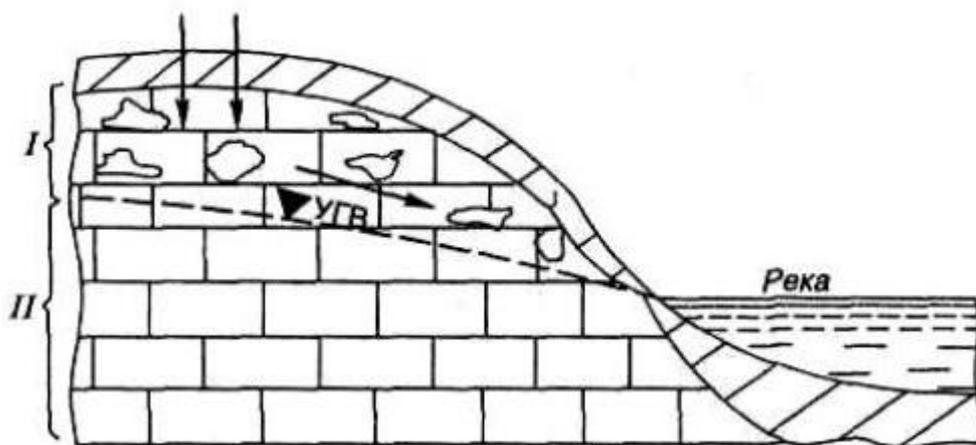


Рис.1. Зоны карстового массива в известняке: I – зона развития карста; II – зона цементации; УГВ – уровень грунтовых вод (Максимович, 1963)

Выщелачивание

Вода в атмосфере может растворять небольшие количества углекислого газа. Когда на землю попадает дождь, в дождевой воде есть необходимое количество углекислоты чтобы растворить горные породы. Когда вода проникает в систему подземных вод и сталкивается с карбонатными породами, кальцит растворяется в известняк. Эта реакция происходит, когда вода протекает через любые типы отверстий в породе, такие как трещины. В течение длительного периода времени большая часть известняка растворяется, что приводит к образованию полостей (Максимович, 1955; Zeitoun, Wakshal, 2013).

Пещеры

Пещеры — это полость в верхней части земной коры, сообщающаяся с поверхностью одним или несколькими входными отверстиями (Маруашвили, 1969). Большинство пещер образуется в результате процесса химического выщелачивания, описанного выше, в результате потока подземных вод. Растворение начинается вдоль систем трещин в горной породе, расширяя трещины и соединяя их с другими трещинами, пока не образуется пещера (Максимович, 1963).

а) Карстовые воронки

Карстовые воронки представляют собой большую полость растворения, которая открыта для земной поверхности. Некоторые провалы образуются при обрушении крыш пещер, другие могут сформироваться на поверхности растворяя камень вниз. Поскольку нас интересуют процессы, приводящие к стихийным действиям, то рассмотрим процессы образования воронок при обрушении.

Карстовые воронки распространены в областях, подстилаемых известняком. Центральная Флорида является такой областью, и в одной небольшой области площадью около 25 км² в результате обвала за последние годы образовалось более 1000 провалов (Zeitoun,

Wakshal, 2013). В январе 2014 года в Нижегородской был зафиксирован очередной карстовый провал. На этом участке провал стал третьим по счету. Исследования провала подтверждают предположение об активном развитии карстовых процессов в районе с. Чудь (Шарпов и др, 2014).

Карстовые воронки могут образовываться в результате понижения уровня грунтовых вод из-за чрезмерного перекачивания воды для человеческой деятельности. Пещеры, которые формировались чуть ниже уровня воды, были заполнены водой. Уровень грунтовых вод за последние годы снизился, в результате чего уровень подземных вод в пещерах стал ниже. В то время как уровень воды был высоким, вода в пещере помогала поддерживать верхнюю часть полости. Эта опора удаляется при опускании уровня грунтовых вод, и таким образом не поддерживаемая крыша в конечном счете становится нестабильной и разрушается, образуя провал в грунте (рис #) (Zeitoun, Wakshal, 2013).

Карстовые воронки могут также образовываться при медленном расширении пещер в результате продолжающегося растворения известняка — карстовых процессов. Это может произойти независимо от уровня грунтовых вод, например, в случае провала грунта.

Хотя обычно в областях, подстилаемых известняком, провалы могут образовываться в любой области, где вблизи поверхности находятся очень растворимые в воде породы. К таким породам относится каменная соль из месторождений минеральных галитов и гипса, которые легко растворяются в подземных водах (Максимович, 1963).

б) Карстовый рельеф

В областях, где хорошо растворимые в воде породы находятся близко к поверхности, растворение под поверхностью может в итоге привести к образованию пещер и провалов. По мере того, как воронки начинают объединяться, рельеф поверхности станет хаотичным, со многими закрытыми бассейнами и ручьями, которые исчезают в воронках, уходят под землю и вновь появляются у источников. Такие процессы известны как карстовый рельеф, формы которого очень разнообразны (рис. 2). Карстовые процессы снаружи определяются, как области с множеством провалов. Поскольку процесс выветривания и растворения подстилающих пород продолжается, то поверхность земли, может быть, понижена, и области, которые не подвергаются обширному растворению, встают как высокие колонны над окружающей местностью (Максимович, 1963).

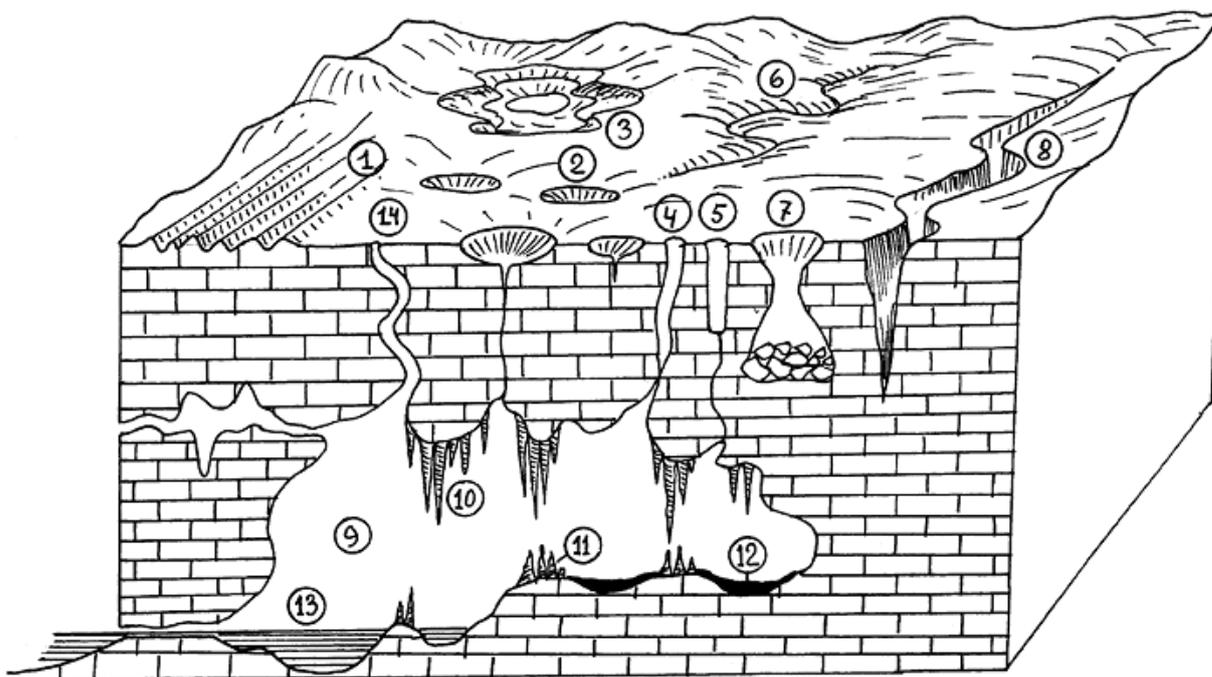


Рис. 2. Карстовые формы рельефа: 1 — карры, 2 — воронки, 3 — полье, 4 — колодцы, 5 — шахты, 6 — исчезающие реки, 7 — провальные воронки, 8 — ущелье, 9 — пещера, 10 — сталактиты, 11 — сталагмиты, 12 — «терра-росса», 13 — пещерное озеро, 14 — сифоны (Максимович, 1963)

1.1.2 Антропогенные причины

Добыча полезных ископаемых

а) Разрушение горных пород и обвалы в шахтах

Люди играют большую роль, вызывая обрушение поверхности. Добыча полезных ископаемых, которая разрушает горные породы, может привести к обвалу шахт (рис. 3), если не будут приняты меры предосторожности для обеспечения адекватной поддержки вышележащих пород.



Рис. 3. ОАО «Уралкалий» город Березники (РИА Новости, 2018)

б) Солеобразование

Соль встречается под поверхностью в областях, которые когда-то были ниже уровня моря в ограниченных бассейнах, где интенсивное испарение привело к тому, что концентрация соли в морской воде стала настолько высокой, что соль выпала в осадок на дне. Это произошло, например, во время юрского периода (около 150 миллионов лет назад) в районе Мексиканского залива. Позднее отложение поверх этой соли привело к образованию солей с низкой плотностью, лежащих в основе отложений с более высокой плотностью. Поскольку соль довольно пластична, она начала течь вверх к поверхности и во многих случаях отрывалась от исходного слоя соли на глубине, образуя так называемый соляной купол. Поскольку соль в настоящее время встречается близко к поверхности, она может растворяться и разрушаться, образуя провалы.

Соль также является природным ресурсом и добывается открытым способом. Один из методов добычи заключается в закачке жидкости в соль для ее растворения. Затем жидкость извлекают, а соль повторно осаждают из растворов. Такая добыча, поскольку она растворяет большие полости в соли, может привести к оседанию грунтов. В результате добычи такого раствора в Хатчинсоне, штат Канзас, образовалась яма диаметром 300 м (Zeitoun, Wakshal, 2013).

Добыча угля

Уголь является наиболее востребованным полезным ископаемым. В начале XX века добыча угля получила широкое распространение и по сей день продолжает относиться к одним из наиболее прибыльных видов добычи залежей полезных ископаемых (Курчин, 2013).

Поскольку добыча полезных ископаемых может создавать пустоты в местах ведения работ, которые могут стать нестабильными и разрушаться. Уголь залегает под поверхностью в виде обширных слоев, называемых угольными пластами.

Как и при других горных работах добыча угля также происходит с последующим оседанием земной поверхности и повышаются риски образования зоны обрушения и сдвижения. Бывают случаи повреждения и разрушения различных объектов на расположенных рядом территориях (рис. 4). Сдвижение горных пород — перемещение и деформирование массива горных пород вследствие нарушения его естественного равновесия при ведении горных работ (Апачиди, 2015).



Рис. 4. Д. Ляньюань (южная провинция Хунань, Китай), расположенная вблизи угольного бассейна (РИА Новости, 2018)

Водоотбор

Региональное снижение уровня подземных вод и изменение гидрогеологических условий среды часто возникает по причине интенсивного водоотбора подземных вод. По этой причине происходит оседание земной поверхности, развитие оползней, а при залегании карстующихся пород — проявление карстово-суффозионных процессов. Все эти

процессы ведут к проявлению эрозии почв. Также инженерно-хозяйственная деятельность, повышающая уровень грунтовых вод на участках, сложенных водоупорными породами, приводит к подтоплениям земель. В следствие чего изменяется химический состав подземных и поверхностных вод, а следовательно, повышается их агрессивность. Таким образом, фундаменты и подземные коммуникации подвергаются коррозии и последующей деформации (Zeitoun, Wakshal, 2013).

Подтопление — это повышение уровня подземных грунтовых вод сверх его критической глубины залегания (как правило, 3 м), приводящее к нарушению хозяйственной деятельности на данной территории и изменению структуры и функций естественных биогеоценозов (Калашник, 2006). Подтоплениям подвергаются до 70% российских городов: Астрахань, Волгоград, Нижний Новгород, Хабаровск и др.

Любая урбанизация земель не обходится без формирования природно-техногенных грунтовых вод, вызывающих хозяйственно-бытовое загрязнение рекреационных зон. Когда рекреационные и архитектурно исторические объекты находятся вблизи промышленных предприятий с водоемким производством, возникает возможность воздействия агрессивных вод на бетон, грунты, металл, что ведет к коррозии зданий и подземных коммуникаций. Подтопление земель, на которых расположены архитектурно исторические ансамбли, благоприятствует их деформации и оседанию земель под ними.

Городские почвы (урбоземы или урбаноземы)

В ходе экологических исследований было установлено, что почвы в урбанизированных районах отличаются от естественных по химическим и воднофизическим свойствам (Синцов, 2011). Городские почвы переуплотнены, горизонты перемешаны и обогащены строительным мусором, бытовыми отходами, ввиду этого имеют более высокую щелочность, чем их природные аналоги. Почва в крупных городах впитала в себя разнообразие разновозрастных исторических почв и культурных слоев, из-за чего отличается высокой контрастностью, неоднородностью из-за сложной истории развития города. Например, в центре города Казани почвы формируются на мощном культурном слое — наследии прошлых эпох, а на окраинах, в районах нового строительства, почвообразование развивается на свежих насыпных или перемешанных грунтах (Деревенская, 2014).

Натуральный почвенный покров на большей части городских земель отсутствует. Он остался только небольшими участками в городских лесопарках.

Городские земли (урбоземы) отличаются по принципу формирования (насыпи и примеси), по гумусированности, по степени нарушенности профиля и т.д. Для большинства городских почв свойственно отсутствие генетических горизонтов и присутствие всевозможных по расцветке и мощности слоев искусственного происхождения. До 30-40%

площади жилых застроенных зон занимают запечатанные почвы (экраноземы), в промышленных зонах доминируют химически загрязнённые индустрисемы на насыпных и привозных грунтах, вблизи АЗС формируются интруземы (перемешанные почвы), а в районах новостроек — почвоподобные тела (реплантоземы) (Коган, 2008).

Ухудшение химических свойств почв во многом происходит из-за «снегоносов», которые зимой применяют хлористый натрий для того, чтобы ускорить процесс освобождения дорожных покрытий от снега. Хлористый натрий, более известный как поваренная соль приводит не только к коррозии подземных коммуникаций, но и к искусственному засолению почвенного слоя (рис. 5). В результате в городах и вдоль автомагистралей появились такие же засоленные почвы, как где-нибудь в сухих степях или на морских побережьях (Деревенская, 2014).

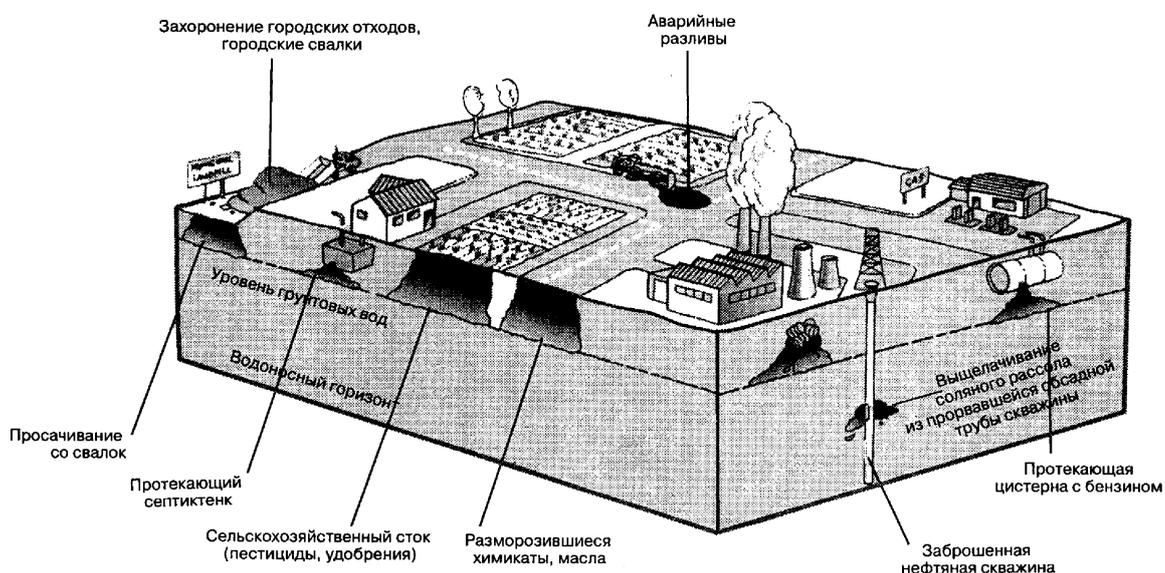


Рис. 5. Типичные механизмы антропогенного загрязнения почв (Джувеликян и др, 2009)

Большая доля загрязняющих веществ попадает в городские почвы с атмосферными осадками, преимущественно с мест складирования промышленных и бытовых отходов.

Особую угрозу влечет за собой загрязнение почв тяжелыми металлами. В городских землях наблюдается повышенное содержание тяжелых металлов, а именно в верхних (до 5 см), искусственно сделанных слоях, которые в 4-6 раз выше фоновое. За последние 15 лет площадь территорий, особо загрязненных тяжелыми металлами, увеличилась в городах в 3 раза и уже обхватывает территории новостроек. К примеру, крайне загрязнен тяжелыми металлами, веществами, относящимися к первому и ко второму классу угроз, исторический центр Москвы. Тут найдено высочайшее загрязнение цинком, кадмием, свинцом, колченогом, никелем и медью и др. Они зафиксированы в почве, листьях деревьев, детских

песочницах (дети, играющие на детских площадках в центре мегаполиса, получают свинца в шесть раз больше, чем взрослые) (Деревенская, 2014).

Загрязнение почв – формирование урбоземов ведет к антропогенной эрозии. Ущерб от эрозии почв характеризуется следующими показателями. На слабо эродированных черноземах Русской равнины снижение толщины гумусового горизонта почвы на 1 см уменьшает урожай зерновых приблизительно на 1 ц/га. Полная и повсеместная компенсация потерь гумуса невыполнима из-за недостатка органических удобрений (а если была бы возможна, обошлась бы в миллиарды рублей в год). С эрозией ежегодно теряется в 1,5 раза больше питательных веществ, чем вносится в виде минеральных удобрений. Смывается 30–50% объема этих удобрений (Неровных и др., 2015).

1.2 Современные методы мониторинга оседаний земной поверхности

Опираясь на опыт мониторинга оседаний земной поверхности в зонах ведения открытых горных работ, можно выделить следующие методы:

- наземные инструментальные наблюдения;
- глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС-технологии);
- наземное лазерное сканирование;
- аэрофотосъёмка;
- съёмка наземным радаром;
- космическое радиолокационное зондирование.

В дополнение к геодезическим наблюдениям также применяются визуальные наблюдения.

1.2.1 Наземные инструментальные наблюдения

В состав комплекса работ по производству наблюдений входит:

1. Создание наблюдательных сетей.
2. Выполнение измерений.
3. Камеральная обработка результатов измерений.

Периодические инструментальные наблюдения проводятся локализовано на специальных наблюдательных станциях. Структура наблюдательной станции включает несколько профильных линий с расположенными на них опорными и рабочими реперами. Закладка опорных и исходных пунктов наблюдательной сети выполняется вне зоны деформирования. Рабочие реперы закладывают в зонах возникновения деформаций. Для выполнения пространственной привязки реперов наблюдательной станции в горизонтальной плоскости используется метод триангуляции либо прокладываются замкнутые полигонометрические ходы от ближайших доступных пунктов триангуляции / полигонометрии. Для привязки реперов наблюдательной станции по высоте выполняется нивелирование II класса от пунктов триангуляции (Кольцов, 2012). Основными методами наземных

инструментальных наблюдений за деформациями земной поверхности являются (Методические указания..., 1987):

- геометрическое нивелирование;
- наблюдения по профильным линиям;
- створные измерения;
- прямые засечки (угловые, линейные);
- линейно-угловые засечки;
- линейные пространственные засечки;
- метод полигонометрических ходов.

Наиболее распространенные инструменты при производствах маркшейдерских наблюдений: электронные теодолиты, нивелиры и тахеометры (Хаметов, 2016).

К недостаткам данного метода можно отнести: высокую стоимость проведения работ (чем выше точность необходима, тем дороже работы) и зависимость от погодных условий и состояние атмосферы (влажности воздуха, наличия взвешенных частиц, тумана, ветра, дыма и др).

1.2.2 ГНСС-мониторинг

ГНСС-мониторинг деформаций основан на многократном переопределении координат пунктов съёмочной сети с использованием ГНСС-приёмников. Определение координат ГНСС-приёмника основано на методе линейных засечек, или трилатерации. В качестве опорных пунктов используются космические аппараты (КА) с координатами, известными на любой момент времени. Расстояние до спутников измеряется с помощью приемной аппаратуры на борту КА и на земной поверхности. Расстояние определяется как произведение времени прохождения радиосигнала пути от КА до приёмника на поверхности Земли на известную скорость распространения в пространстве электромагнитных колебаний. Для определения трехмерных координат точки достаточно знать расстояния до трёх КА. На пересечении трех сфер, образованных расстояниями до КА, будут расположены две точки, одна из которых находится на земной поверхности, а вторая – ложная (Огородова, 2015). В настоящее время действуют следующие глобальные системы: GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), Galileo (ЕС), BeiDou (Китай).

Для повышения точности измерений на сегодняшний день применяются методы:

- 1) дифференциальная ГНСС (DGNSS/Differential Global Navigation Satellite Systems): базисное расстояние составляет 100-200 км, точность ± 1 м (рис. 6);

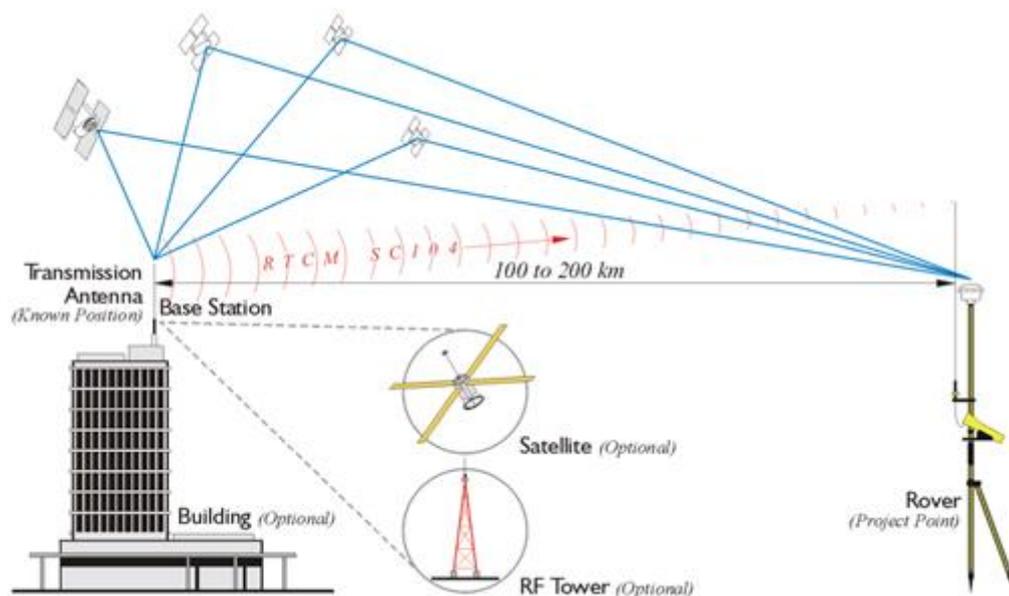


Рис. 6. Дифференциальная ГНСС (GEOG 862, 2019)

- 2) ГНСС РТК (RTK/Real Time Kinematic): базисное расстояние может достигать 10-20 км при точности ± 2 см (рис. 7).

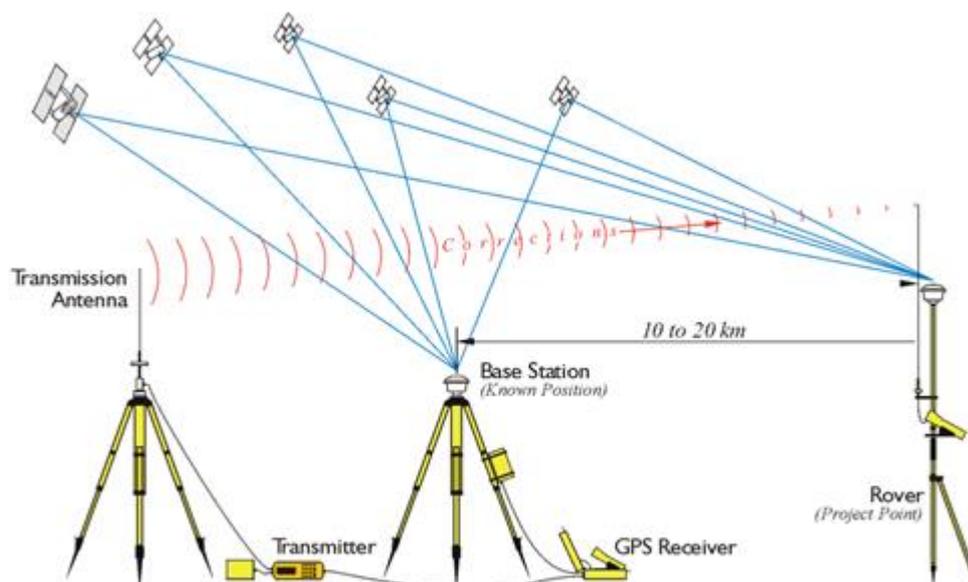


Рис. 7. ГНСС РТК (GEOG 862, 2019)

К преимуществам технологий ГНСС для наземных наблюдений можно отнести возможность оперативно получать данные независимо от времени года и времени суток. Данный метод является точечным, съёмка производится непосредственно на участках возникновения смещений, в связи с чем говоря о получении данных на обширные территории и проведение масштабного мониторинга не представляется возможным. Также одним из необходимых условий проведения ГНСС-наблюдений является наличие в зоне видимости достаточного количества спутников, что создает трудности при съёмке.

1.2.3 Аэрофотосъёмка

На сегодняшний день основным фотограмметрическим инструментом являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Это связано с тем, что для традиционных методов аэрофотосъёмки с использованием самолетов и вертолетов характерны высокие экономические затраты и, как следствие, высокая стоимость получаемой продукции (Зинченко, 2018).

Работы проводимые с использованием БПЛА позволяют значительно снизить стоимость выполнения аэрофотосъёмки территорий. Также применение БПЛА позволяет выполнять наблюдения поверхности с небольших высот, получая при этом данные высокого пространственного разрешения — на высоте относительно поверхности земли до 100 м детализация изображений достигает 1 см местности на 1 пиксель изображения (Смирнов, 2015). Съёмка на высоте ниже уровня облаков дает возможность выполнять наблюдения даже в условиях облачности. В настоящее время технология выполнения аэрофотосъёмки с БПЛА отработана на высоком уровне и позволяет оперативно получать аэрофотоснимки для создания и обновления картографической основы территории. Как площадной метод наблюдений, аэрофотосъёмка обеспечивает создание детальных цифровых моделей поверхности (ООО «Геоскан», 2019). Аэрофотосъёмка независимо от типа используемого летательного аппарата требует проведения наземных измерений (планово-высотного обоснования), объем которых зависит от особенностей применяемой съёмочной аппаратуры.

Необходимые условия проведения работ: влажность (до 98%), температура воздуха (от - 30° до +55°), скорость ветра (при старте — до 8 м; при посадке — до 4-13 м). Недостатком аэрофотосъёмки с БПЛА также является их повышенная аварийность (Зинченко, 2018). На сегодняшний день основное направление применения аэрофотосъёмки в области мониторинга оседаний земной поверхности приходится на объекты открытой разработки — это расчёт объёмов по вскрыше и добыче при анализе динамики выполнения горных работ (Смирнов, 2015). Для решения задач мониторинга урбанизированных районов использование БПЛА представляется дорогостоящим.

1.2.4 Наземное лазерное сканирование

В процессе наземного лазерного сканирования (НЛС) с высокой скоростью измеряются расстояния от сканера до точек объекта и регистрируются соответствующие направления — вертикальные и горизонтальные углы. Система НЛС выполняет тотальную съёмку объекта, а не отдельных точек, и результатом работы его трехмерное изображение. При НЛС применяются лазерные дальнометры, в основе работы которых лежат импульсный и фазовый безотражательные методы измерения расстояний, метод прямой угловой засечки. Преимуществами НЛС являются:

- возможность трехмерной визуализации объектов в режиме реального времени;
- высокая точность измерений;
- безопасность исполнителя при съемке на труднодоступных и опасных участках;
- высокая производительность полевых работ;
- высокая степень детализации результатов сканирования.

К недостаткам относятся:

- чрезвычайно большой и, как правило, избыточный объем получаемой информации;
- высокая стоимость проведения работ;
- зависимость от метеоусловий;
- ограничения по дальности сканирования (Гусев, 2011; Середович, 2009).

1.2.5 Наземные радарные системы

Принцип работы системы в целом аналогичен работе лазерных сканеров, только вместо лазерного луча используется радиоволновое излучение. Радарные системы имеют высокую точность измерений (погрешность до 1 мм). Для высокоточного распознавания деформаций в радарх используются дифференциальные интерферометры, осуществляющие сравнение фаз и интенсивности отраженных сигналов двух последовательных сканирований объекта. В отличие от лазерных сканеров, радары могут использоваться вне зависимости от атмосферных условий (дождь, снег, пыль, задымленность), времени суток и при температурах от -40°C до $+55^{\circ}\text{C}$, что является важным аспектом при работе на открытых разработках. Для применения радаров также не требуется закрепления на откосах отражателей (призм), что значительно упрощает организацию мониторинга и исключает необходимость нахождения персонала в потенциально опасных зонах. Недостатками применения наземных радаров является высокая стоимость оборудования и проведения работ. Наземный радар имеет ограниченный угол обзора и меньшую, в сравнении с космическим, площадь измерений. Измерения деформаций выполняются относительно «луча визирования». Это наземный метод, подразумевающий выполнение работ на объекте (Casagli et al., 2010).

1.2.6 Космическое радиолокационное зондирование

Радиолокационная съёмка является активным методом наблюдения: с помощью радарной антенны пространство облучается зондирующим сигналом, затем выполняется приём и обработка отраженного сигнала. На основании отражённого сигнала формируются радиолокационные изображения (РЛИ), которые содержат информацию о различных свойствах объектов зондирования (Верба и др., 2010).

Основным средством космического радиолокационного зондирования является радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА). РСА – активный когерентный датчик, установленный на борту самолёта или спутника.

Принцип работы РСА подробнее рассмотрен во 2 главе. Основные этапы можно обозначить следующим образом:

1. Передатчик, установленный на борту спутника, формирует зондирующие сигналы.
2. С помощью радарной антенны выполняется зондирование поверхности.
3. Отраженные от поверхности сигналы принимаются записываются на специальном устройстве с фиксированием амплитуды и фазы сигнала.
4. Выполняется последовательное когерентное суммирование сигналов, принятых на отрезке полёта.

Определение смещений земной поверхности осуществляется на основе метода радарной интерферометрии, использующего фазовую информацию нескольких циклов когерентных измерений определенного участка земной поверхности с изменением положения радара в пространстве. Технология космической радарной интерферометрии является высокоточным методом прямого определения деформаций поверхности (Баранов и др., 2009). Космическая радарная съёмка позволяет проводить измерения независимо от естественной освещенности земной поверхности и состояния облачного покрова, получая при этом оперативные данные высокого пространственного разрешения в широкой полосе обзора. Основным же достоинством этого метода являются получение площадных данных для множества точек, расположенных на всей наблюдаемой поверхности, включая опасные и труднодоступные участки. Космическая радиолокация является полностью дистанционным методом, не требующим присутствия на объекте, характеризуется широким пространственным охватом и высокой точностью определения смещений, регулярностью и оперативностью получения данных, возможностью получения «исторических» данных. При этом отсутствует транспортная составляющая, получение и обработка данных проводятся удалённо.

ГЛАВА 2. МИРОВОЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

2.1 Основные принципы и характеристика радиолокационного зондирования Земли

Радиолокационная (РЛ) съемка – вид аэрокосмической съемки, осуществляемой радиолокатором – активным микроволновым датчиком, способным излучать и принимать рассеянные земной поверхностью поляризованные радиоволны в определенных диапазонах длин волн (частот). Обратный сигнал несет в себе информацию о физических и геометрических свойствах зондируемой поверхности (Верба и др., 2010).

Радиолокационная космическая съемка выполняется в ультракоротковолновой (сверхвысокочастотной) области радиоволн, подразделяемой на X-, C-, и L-диапазоны (табл. 1) (Кантемиров, 2010).

Таблица 1.

Диапазоны радиоволновой области электромагнитного спектра, в которых выполняется (или выполнялась) космическая съемка

Диапазон	Частоты, ГГц	Длины волн, см
X	5,20 – 10,90	2,75 – 5,77 (2,40 -3,80)
L	3,90 – 6,20	3,80 – 7,60
C	0,39 – 1,55	19,30 – 76,90 (15 – 30)

В настоящее время космическая съёмка Земли в радиоволновом диапазоне осуществляется с использованием радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) История съёмки Земли из космоса РСА началась с запуска американского спутника Seasat в 1978 г. Согласно (Верба и др., 2010; Леухин, 2018) весь период существования космических РСА можно разделить на четыре этапа:

1) Исследовательский этап (1978-1992 гг.) – РСА первого поколения, осуществлявшие съёмки в одном режиме и в одной поляризации американские РСА Seasat-A (1978 г.), SIR-A (1981 г.), SIR-B (1982 г.), отечественные РСА «Меч-К» и «Меч-КУ» КА «Космос-1870» (1987–1989 гг.) и «Алмаз-1» (1991–1992 гг.), поляриметрического РСА SIR-C/X-SAR (1994 г.) совместной разработки США и Германии. Их данные использовались для оценки

потенциала космических РСА при решении задач изучения природных ресурсов, мониторинга поверхности океана, ведения сельского и лесного хозяйства и др.

На этом этапе был накоплен большой экспериментальный материал, отработаны методы решения задач военной разведки, разработаны методики, а также программные пакеты для обработки и интерпретации получаемых радиолокационных изображений (РЛИ).

2) 1992-2000 – РСА второго поколения на европейских КА ERS-1 (1991–2000 гг.), ERS-2 (с 1995 г. – по настоящее время), канадского Radarsat-1 (с 1995 г.), японского JERS-1 (1992–1998 гг.), военных спутников США Lacrose (запуски в 1988, 1991, 1997, 2000, 2005 гг.). Все РСА проводили съёмку в одной поляризации и одном режиме (кроме радиолокатора на спутнике Radarsat-1, функционировавшего в 7 съёмочных режимах), однако основным их отличием от систем первого поколения являлось обеспечение развитой наземной инфраструктурой обработки и распространения данных. Уникальным можно назвать функционировавший в этот же период трёхчастотный (X, C, L диапазоны) поляриметрический радиолокационный комплекс SIR-C/X-SAR, который размещался на борту многоразового космического корабля Space Shuttle.

На втором этапе было произведено уточнение методик тематической обработки радиолокационных снимков и их применение для решения практических задач ДЗЗ в разных сферах деятельности.

3) 2000-2007 гг. – РСА третьего поколения. Начало этого этапа ознаменовалось реализацией миссии Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) в 2000 г., в ходе которой за 11 суток была осуществлена съёмка 80% суши в диапазонах C и X в интерферометрическом режиме. В результате обработки этих данных была создана широко известная цифровая модель рельефа (ЦМР) SRTM. К этому же периоду относятся поляриметрические РСА C-диапазона, размещённые на КА Envisat/ASAR и Radarsat-2, а также РСА L-диапазона на КА ALOS/PALSAR.

Третий этап характеризуется резким скачком в технологии радиолокационной съёмки и широким коммерческим использованием космической радиолокационной информации, в том числе для частных потребителей.

4) 2007 – 2010 – РСА четвёртого поколения TerraSAR-X и TanDEM-X, Cosmo-SkyMED и др., осуществляющие съёмку в том числе и сверхвысокого разрешения (<1 м). Именно с середины 2000-х гг. начался особенно бурный рост количества космических РСА, в связи с чем в работе (Moreira et al., 2013) отмечается, что наступил «золотой век» космической радиолокации.

Четвертый этап характеризуется информационным взрывом в области космических радаров, который произошел в 2007 г., когда Германия, Италия, Китай, Япония и Канада вывели на орбиты 9 спутников с бортовыми радарными.

История создания и развития характеристик космических РСА наглядно представлена в табл. 2 (Трошко, 2018; Satellite Missions...). Помимо приведенных в них космических систем с РСА разными странами эксплуатировались в прошлом и в настоящее время системы военного назначения (Lacrosse (США), SAR-Lupe (Германия), TecSAR (Израиль) и др.), однако ввиду того, что сведения об этих системах ограничены, а получаемые ими данные недоступны рядовым пользователям, останавливаться подробно на них не будем (Трошко, 2018).

Таблица 2.

КА с РСА

Космический аппарат/съёмочная система	Страны	Срок функционирования, гг.	Диапазон длин волн	Пространственное разрешение, м*	Ширина полосы съёмки, км*	Поляризация*
<i>Вышедшие из эксплуатации</i>						
Seasat	США	Июнь-октябрь 1978	L	25	100	ГГ
Shuttle Columbia/SIR-A	США	1981	L	40	50	ГГ
Shuttle Challenger/SIR-B	США	Октябрь 1984	L	(20-30)х(58-16) (аз.х дальн.)	20-40	ГГ
Космос-1870/Меч-К	СССР	1987-1989	S	25-30	20	ГГ
Алмаз-1А/Меч-КУ	СССР	Март 1991 – сентябрь 1992	S	10-15	35-55	ГГ
ERS-1, 2	ЕС	Июль 1991 – март 2000 апрель 1995 – июль 2011	C	25	10	ВВ
JERS	Япония	Февраль 1992 – октябрь 1998	L	18	75	ГГ
Shuttle Endeavour/SIR-C/X-SAR	США	9-20 апреля, 30 сентября-11 октября 1994	C, L/ X	30	15-90	Четыре/ ВВ
Radarsat-1	Канада	Ноябрь 1995 – май 2013	C	8-100	50-500	ГГ

Shuttle Endeavour/ X-RADAR, C-RADAR (SRTM)	США	11-22 февраля 2000	X/ С	30	50/225	ВВ/две
Envisat/ASAR	ЕС	Март 2002 – май 2012	С	30-1000	100-400	Одна или две
ALOS/PALSAR	Япония	Январь 2006 – Май 2011	L	7-100	20-350	Одна, две или четыре
<i>Действующие</i>						
Radarsat-2	Канада	Декабрь 2007	С	1,6-160	20-500	Одна, две или четыре
TerraSAR-X TanDEM-X	Германия	Июнь 2007, Июнь 2010	X	<1-40	4-270	Одна или две
COSMO-SkyMed-1-4	Италия	Июнь 2007, декабрь 2007, октябрь 2008, ноябрь 2010	X	1-100	10-200	Одна или две
Risat-1	Индия	Апрель 2012	С	1-30	10-240	Одна, две, четыре или гибридная
Kompsat-5	Республика Корея	Август 2013	X	1-20	5-100	Одна на выбор
Sentinel-1A Sentinel-1B	ЕС	Апрель 2014, апрель 2016	С	5-40	20-400	Одна или две
ALOS-2/PALSAR-2	Япония	Май 2014	L	1-100	25-350	Одна, две, четыре или компактная
Gaofen-3	Китай	Август 2016	С	1-500	10-650	Одна, две или четыре
ICEYE-X1	Финляндия	Январь 2018	X	10	40x80	Гибридная
ASNARO-2	Япония	Январь 2018	X	<1-16	10-50	Одна на выбор

* – параметры меняются в зависимости от режима съёмки

2.2 Принципы радиолокационной интерферометрии

РСА-интерферометрия (радар с синтезированной апертурой) или InSAR (от Interferometric Synthetic Aperture Radar) является эффективным методом построения цифровых моделей рельефа (ЦМР) и мониторинга динамики поверхности Земли за

период между повторными съемками с точностью, недостижимой поверхностными измерениями (Коберниченко, 2013).

В основе понятия интерферометрии лежит интерференция, как одно из ярких проявлений волновой природы света. Интерферометрия в обобщенном понимании — это высокоточный метод измерения, основанный на использовании эффекта интерференции электромагнитных волн. Этот метод является чрезвычайно привлекательным с точки зрения получаемых результатов. Связано это с тем, что теоретически достижимая точность метода составляет доли длины волны используемого в интерферометре когерентного источника электромагнитного излучения. Так, если в оптических интерферометрах использовать лазер с длиной волны равной долям микрометра, то измерять форму оптической поверхности (например, астрономического зеркала) можно с точностью уровня нанометров. В современных приложениях радиолокационного зондирования земной поверхности длина волны исчисляется сантиметрами, что дает основание рассчитывать на миллиметровую точность получаемых результатов.

РСА, используемый в настоящее время как основное средство дистанционного зондирования Земли в СВЧ диапазоне электромагнитных волн, является когерентным датчиком, т.е. излучает управляемой фазой. Это означает, что теоретически он может быть использован для интерферометрических измерений. Радиолокатор является активным датчиком в том смысле, что подсвечивает подстилающую поверхность для получения ответного сигнала на входе приемного устройства (Доросинский, 2017).

В общем случае радиолокационное изображение является комплексным, то есть из него можно извлечь амплитуду, характеризующую яркость поверхности и фазу, обусловленную временной задержкой сигнала и длиной волны РСА. Фаза может быть в дальнейшем использована для измерения высоты рельефа поверхности с точностью до единиц метров и пространственного сдвига поверхности с точностью порядка сантиметров и даже миллиметров.

На рис. 8 иллюстрирован принцип формирования изображения РСА (Вики-фотограмметрия, 2019).

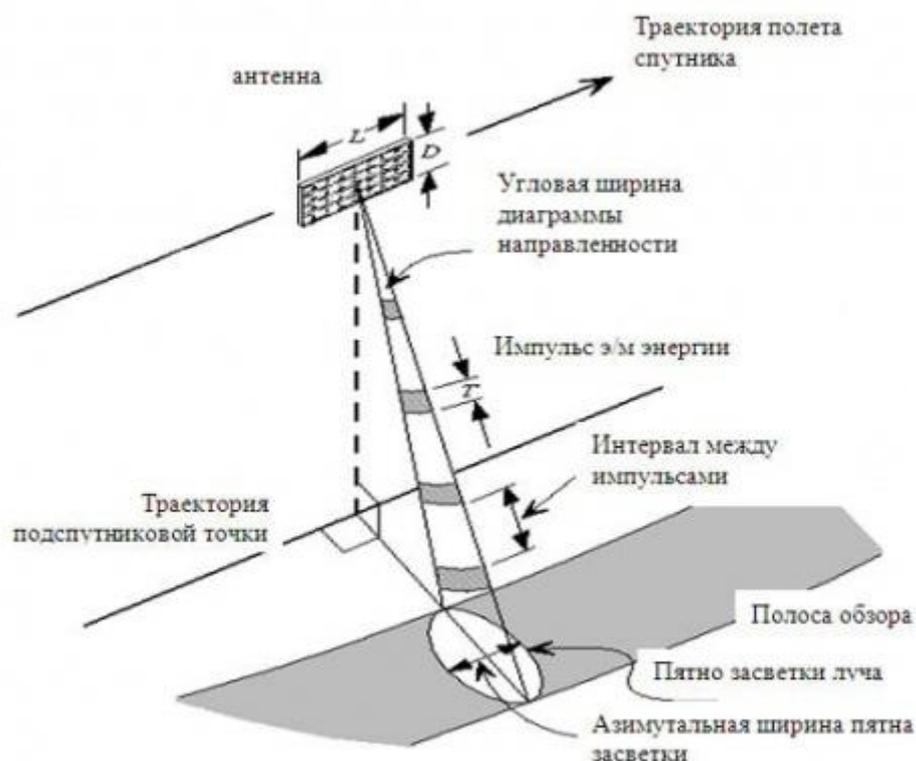


Рис. 8. Принципы формирования изображения в космических радиолокаторах (Вики-фотограмметрия, 2019)

Технология интерферометрической обработки данных РСА предполагает проведение нескольких когерентных измерений одного и того же участка земной поверхности со сдвигом в пространстве приемной антенны радиолокатора. Таким образом, мы получаем удобный инструмент для построения цифровых моделей рельефа, измерения сдвигов земной поверхности или выявления и определения скорости движущихся объектов (PHOTOMOD Radar, 2019).

Технология интерферометрической обработки

Любые интерферометрические измерения требуют наличия двух или более устройств, способных регистрировать электромагнитные волны и разнесённых в пространстве на некоторое расстояние, называемое интерферометрической базовой линией. Применительно к радиолокационным съемкам ориентация базовой линии вдоль или поперек направления движения носителя РСА определяет тип интерферометрических измерений, так что можно говорить о продольной интерферометрии и поперечной. Существуют вполне определённые требования к базовой линии, при которых только и возможна интерферометрическая обработка.

Технология продольной интерферометрии основана на измерениях, проводимых в плоскости, параллельной движению носителя РСА (рис. 9а). Общаются сигналы, полученные одновременно от двух антенн, разнесённых вдоль линии пути радиолокатора.

Такие измерения позволяют обнаруживать движущиеся объекты на фоне подстилающей поверхности и измерять их радиальную скорость.

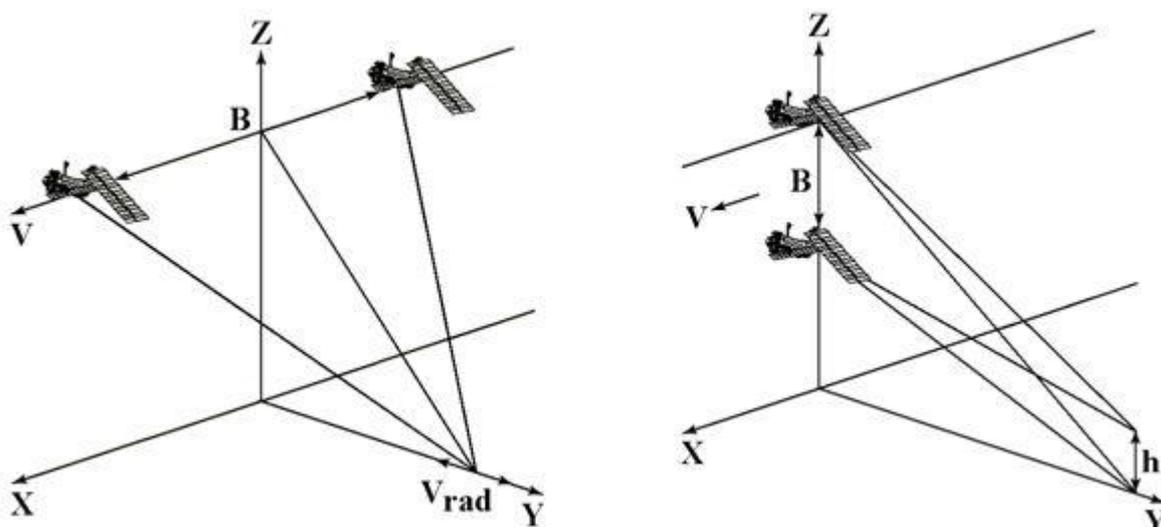


Рис. 9а — геометрия обзора при продольной интерферометрии; 9б — геометрия обзора при поперечной интерферометрии (Вики-фотограмметрия)

Для поперечной интерферометрии две или более антенны должны быть разнесены в плоскости, перпендикулярной направлению полета носителя РСА (рис. 9б). Совместная обработка фазовой информации, получаемой двумя антеннами одновременно или через промежуток времени, позволяет восстанавливать рельеф подстилающей поверхности. Именно технология извлечения высот рельефа по фазовой информации двух съемок часто называется просто интерферометрией. Если интерферометрическая съёмка производится системой РСА, включающей две антенны, одна из которых работает на передачу, а две на приём, то говорят о механической или «жесткой» базовой линии и об однопроходной интерферометрии. Если же один и тот же участок поверхности снимается дважды через некоторый промежуток времени системой РСА с одной антенной, то такая технология называется двухпроходной интерферометрией, а базовая линия становится «виртуальной». Принцип двухпроходной интерферометрии с «виртуальной» базой может быть реализован одновременной съёмкой двух систем РСА с одной антенной, находящихся на параллельных траекториях. Двухпроходная дифференциальная интерферометрия требует наличия цифровой модели рельефа на зондируемую поверхность, а съёмки должны производиться до и после смещения. Опорная фазовая информация о рельефе извлекается из ЦМР путём моделирования геометрии обзора (Вики-фотограмметрия, 2019).

2.3 Методы интерферометрической обработки

На сегодняшний день существует несколько методов интерферометрической обработки, к ним можно отнести классическую дифференциальную интерферометрию

(DInSAR) и серийные методы SBAS (Small Baseline Subset, метод малых базовых линий), PSI (Persistent Scatterers Interferometry, интерферометрия постоянных рассеивателей), IPTA (Interferometric Point Target Analysis, интерферометрический анализ точечных целей).

Дифференциальную интерферометрия (DInSAR)

Под технологией дифференциальной радиолокационной интерферометрии обычно понимается совместная обработка двух или более разновременных съемок, сделанных РСА с одной приемо-передающей антенной и удовлетворяющих требованиям к базовой линии. Соответственно, различают двух, трех, и четырёхпроходную дифференциальную интерферометрию, а также технологию т.н. «стабильных отражателей», требующую, как правило, наличия множества интерферометрических пар, полученных за достаточно длительный промежуток времени. Целью дифференциальной интерферометрии является решение задачи выявления смещений подстилающей поверхности сантиметровой и миллиметровой точности. Эта задача требует правильного выбора времени съемок. Так, при трёхпроходной интерферометрии две съемки должны быть сделаны через промежуток времени, в течение которого поверхность была стабильна, а третья — таким образом, чтобы изменения поверхности произошли за время между ней и остальными двумя, при этом не имеет значения, до или после изменений поверхности эта съёмка была сделана. Здесь две съемки по стабильной поверхности дают опорную разностно-фазовую картину, характеризующую только рельеф, а третья в сочетании с одной из первых двух содержит информацию о совокупности фазы рельефа и смещениях.

При четырёхпроходной интерферометрии две съёмки производятся до изменений, а две — после, так что можно сформировать две разностно-фазовые картины поверхности и их вычитанием выявить происшедшие смещения.

Двухпроходная дифференциальная интерферометрия требует наличия цифровой модели рельефа на зондируемую поверхность, а съемки должны производиться до и после смещения. Опорная фазовая информация о рельефе извлекается из ЦМР путем моделирования геометрии обзора (PHOTOMOD Radar, 2019).

Так, например, в исследовании оседания в городской местности Сарно, проведённым группой итальянских ученых использовался метод мультивременного DInSAR (Cascini, 2006). Проводился мониторинг для изучения последствий явления оседаний земной поверхности, связанного с отводом подземных вод, на древних малоэтажных каменных зданиях, расположенных в городской зоне Сарно, Италия. Данные SAR ERS-1/2 за период с 1992 по 2002 год были проанализированы, и результаты были подтверждены геодезическими данными. Полученные результаты послужили стимулом для будущих разработок и

для изучения и использования мультитременного метода DInSAR для снижения риска оседания.

В 2007 году вышла статья, уже написанная испанскими учеными «Расширенный анализ DInSAR на горнодобывающих территориях в городе Ла Юнион» (Herrera et al., 2007). Город Ла Юнион (Юго-восток Испании) расположен в области добычи металла, которая эксплуатировалась с римского периода. Эта историческая эксплуатация оставила высокую концентрацию заброшенных подземных шахтных туннелей. В настоящее время промышленная зона затухает из-за обрушения одного из этих туннелей в мае 1998 года. В статье для изучения явлений оседания для исследования явлений оседания использовался усовершенствованный метод дифференциальной интерферометрии, называемый техникой когерентных пикселей (СРТ). Два временных интервала, с января 1998 года по декабрь 2000 года и с марта 2003 года по декабрь 2004 года. Карты деформаций (рис. 10), полученные с помощью DInSAR, позволили обнаруживать и отслеживать различные процессы деформации, которые затрагивают несколько мест в пределах района исследования.

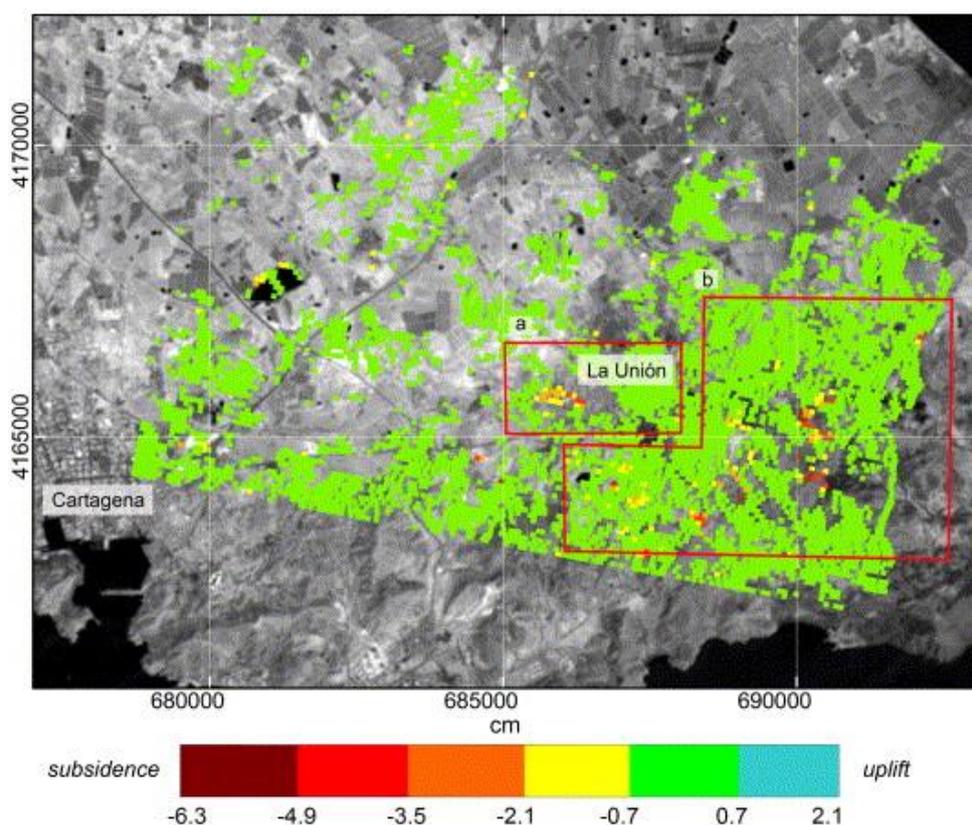


Рис. 10. Карты деформаций на территорию города Ла Юнион за период с 1998 по 2004 года (Herrera et al., 2007)

Сравнивая эти результаты с картой подземных шахтных туннелей, была доказана четкая связь между их присутствием и оседанием. Значения деформации, полученные с помощью DInSAR в период с апреля 2003 г. по декабрь 2004 г., сравнивались с измерениями

топографической нивелирной сети, выполненными в тот же период, что позволило получить абсолютную среднюю разницу 0,7 см со стандартным отклонением 0,5 см. Результаты, полученные в городе Ла Юнион, показали, что усовершенствованная методика DInSAR способна обеспечить очень полезные данные пространственной и временной деформации для измерения мелкомасштабного оседания в течение коротких периодов времени. Этот метод позволил изучить временную эволюцию явлений в городе Ла-Юнион и расширить понимание проседания за пределы развернутой сети топографического контроля более экономически эффективным способом, чем классические методы. Развитие метода дифференциальной интерферометрии довольно активно и разрабатывался с целью давать все более точную статистику и информацию для здравоохранения.

Под руководством Альбы Йеро было проведено исследование применения метода дифференциальной интерферометрии для мониторинга наземных движений в геологически сложном районе вокруг деревни Суриа (бассейн Эбро, Каталония, Испания), связанных с подземной добычей полезных ископаемых и на наличие соляного купола (Yerro et al., 2014). Анализ в основном проводился в сельской местности, затронутой наземными движениями с различными закономерностями, масштабами и причинами. Всего пятьдесят изображений SAR, полученных в период с 1995 по 2007 год, были обработаны для создания интерферограмм. Чтобы изучить нелинейные тренды или изменения поведения поверхности земли, метод DInSAR был применен в двух наборах изображений. Результаты интерферометрии в виде карт скорости вертикального смещения были проверены на основе обычных съемок и измерений GPS (рис. 11).

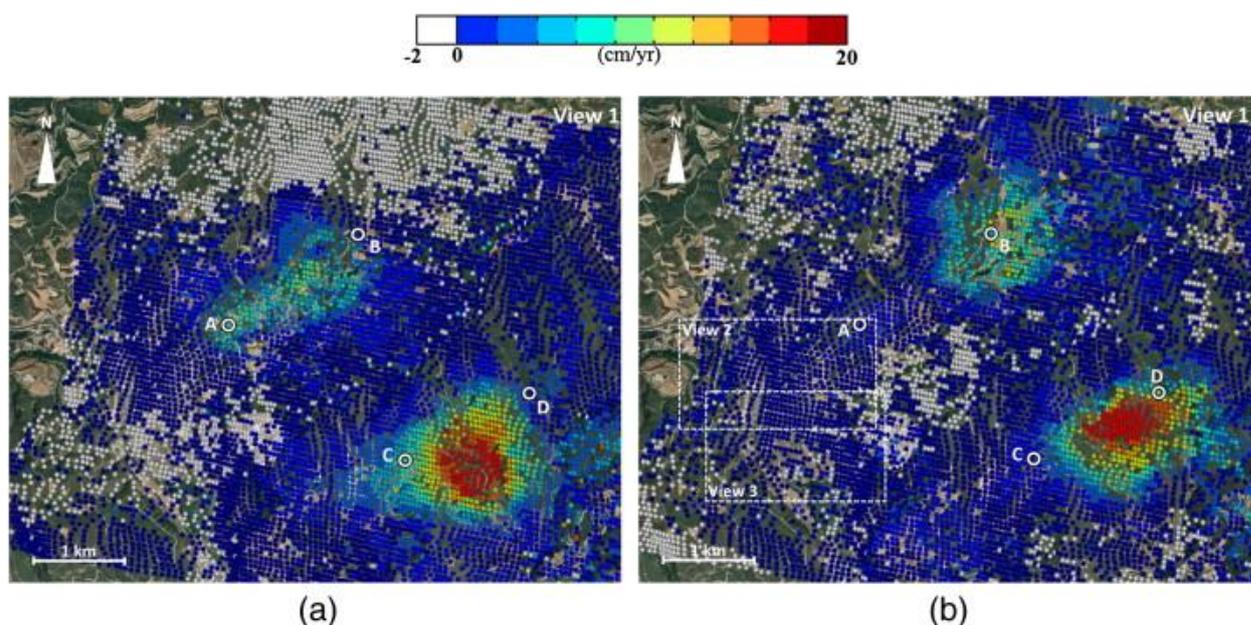


Рис. 11. Карты скорости вертикальных смещений: (а) – первый набор данных за 1995 – 2000 года, (b) – второй за 2000 – 2007 года (Yerro et al., 2014)

Карты деформаций представляют значительное расхождение в некоторых местах из-за обтекания фазы, когда происходят как быстрые, так и значительные деформации. Чтобы избежать последнего эффекта и повысить точность результатов, все изображения SAR были повторно обработаны с использованием топографического нивелирования и данных GPS различных контролируемых точек. Для поддержки интерпретации DInSAR была проведена подробная геологическая разведка исследуемой территории, а также инвентаризация индикаторов движения грунта. Были идентифицированы четыре различных типа движения грунта: активное смещение оседания, связанное с развитием фронтов добычи полезных ископаемых; остаточное оседание на заброшенных шахтах с уменьшающейся скоростью закрытия; поднятия из-за вторжения соляного купола; и внезапные обвалы грунта (провалы), вызванные растворением растворимых материалов, лежащих близко к поверхности земли.

Об активном применении и развитии идей данного метода свидетельствуют работы европейских ученых, хотя в основном все их работы основываются на коммерческих данных и небольших территориях (Peduto et al., 2015; Fernandez et al., 2009; Samsonov et al., 2014).

Метод малых базовых линий SBAS

Метод малых базовых линий (Ghiglia, 1994) позволяет регистрировать деформации земной поверхности и анализировать их пространственно-временные характеристики (Valero, 1995). Идея метода заключается в поиске таких отражающих площадок, в которых влияние шумов минимально. Для таких пикселей производится разделение фазы, связанной с деформациями и фазовыми смещениями, выраженными атмосферными и ЦМР-артефактами. В частности, погрешности в ЦМР создают фазовые смещения, прямо пропорциональные перпендикулярной базовой линии. Для атмосферных помех принимается, что они плавно меняются в пространстве, но быстро – во времени. На этой основе вклад атмосферы и ошибок в ЦМР устанавливается и устраняется, что позволяет выделить составляющую, связанную со смещением площадок во времени.

Пусть имеется набор из $N+1$ интерферометрических снимков одного и того же участка поверхности, сделанных в моменты времени t_0, t_1, \dots, t_N . Будем считать, что уже выполнена процедура корегистрации относительно выбранного базового снимка, т.е. значения фазы и амплитуды на всех снимках проинтерполированы на одну и ту же сетку точек в системе координат выбранного мастер-снимка (Hellwich, 1999).

Вначале из полного набора снимков рассчитывается M интерферограмм, для которых выбирают пары снимков с наименьшей декорреляцией. Для этого используют пары снимков с наименьшей пространственной и временной базовой линией и с наименьшим сдвигом по частоте между доплеровскими центроидами (Ксендзук, 2002). Далее

формируются новые группы близких снимков и, таким образом, весь набор снимков оказывается разделенным на несколько групп, имеющих близкие характеристики. Данные по этим группам надо будет в дальнейшем объединить, чтобы оценить изменение смещений во времени.

Поскольку каждая парная интерферограмма представляет смещения по модулю 2π (так называемая свернутая фаза), проводится развертка фазы с тем, чтобы получить полное смещение в направлении на спутник. При проведении развертки чаще всего сначала применяют алгоритм «минимальной стоимости», а затем алгоритм «растущих подобластей». Первый алгоритм развертывает фазу в областях с хорошей корреляцией, а второй соединяет эти области, т.е. выполняет развертку в областях с низким отношением сигнал/шум (Дмитриев, 2013).

Фундаментальный труд в области метода малых базовых линий был опубликован в 2004 году принадлежит группе европейских ученых из IEEE (Lanari et al., 2004). В данной статье представлено исследование деформационных явлений на интерферограммах DIFSAR с полным разрешением. Предложенный алгоритм расширяет возможности метода малых базовых линий, который опирается только на интерферограммы DIFSAR с небольшими базовыми линиями и в основном сфокусирован на исследовании крупномасштабных деформаций. Предложенная методика реализована с использованием двух разных наборов данных, сгенерированных с низким и полным пространственным разрешением (рис. 12).

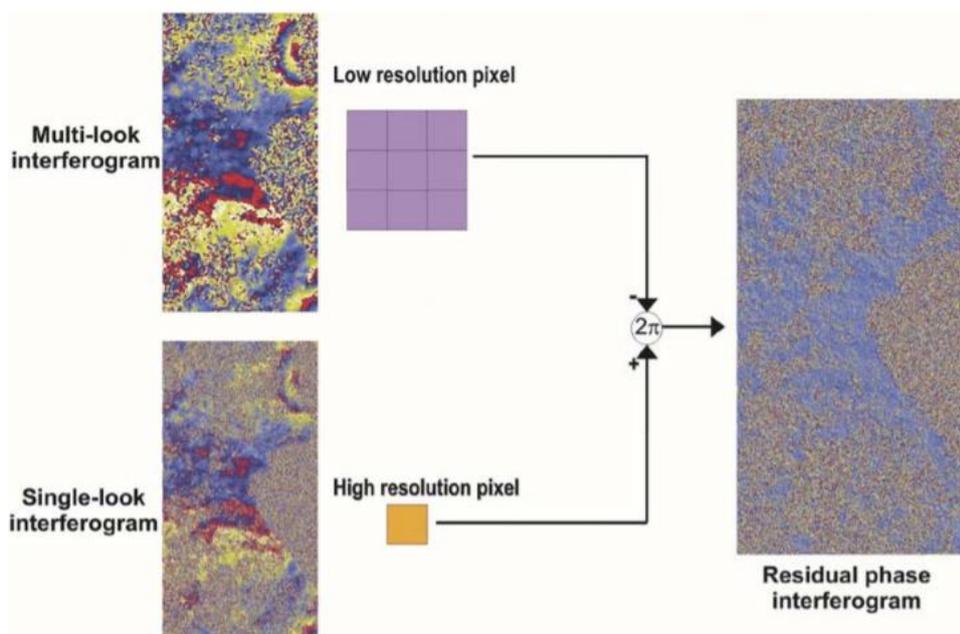


Рис. 12. Пример результатов обработки данных низкого разрешения (верхнее изображение) и высокого (нижнего) (Lanari et al., 2004)

Первый из них используется для идентификации и оценки с помощью обычной методики SBAS диаграмм деформации большого пространственного масштаба,

топографических ошибок в доступной цифровой модели рельефа и возможных артефактов атмосферной фазы; последнее позволяет определять с высокой разрешающей способностью компоненты остаточной фазы, структуры, очень когерентные во времени (здания, камни, лава, сооружения и т. д.), а также их высоту и смещения. В частности, оценка временных изменений этих локальных деформаций легко осуществляется путем применения метода разложения по сингулярным числам. Предложенный алгоритм был протестирован с данными, полученными европейскими спутниками дистанционного зондирования ERS-1/2 относительно района Италии и проверен с помощью геодезических измерений. Каник Гоел и Нико Адам в своем труде "Усовершенствованный алгоритм оценки деформации в не урбанизированных районах" предложили новые аспекты данной методики (Goel, Adam, 2012). В данной статье представлен усовершенствованный алгоритм дифференциальной суммирования SAR-интерферометрии для мониторинга деформации с высоким разрешением в не городских районах с акцентом на распределенные рассеиватели (DS). Разложение по сингулярным значениям (SVD), то есть минимизация нормы L2 применяется для связывания независимых подмножеств, разделенных большими базовыми линиями. Тем не менее, интерферограммы, используемые в SBAS, обрабатываются с использованием скользящего окна для уменьшения фазового шума, вызванного, например, временной декорреляцией, что приводит к потере разрешения и суперпозиции сигналов топографии и деформации от различных объектов. Кроме того, они должны быть развернуты по отдельности, и это может быть особенно трудно в естественных условиях. Представлена улучшенная методика оценки деформации, которая использует данные SAR высокого разрешения и подходит для сельских районов.

Реализованный метод использует небольшие базовые дифференциальные интерферограммы и включает в себя объектную адаптивную пространственную фазовую фильтрацию и удаление остаточной топографии для точной оценки фазы и когерентности, сохраняя при этом высокое разрешение, обеспечиваемое современными спутниками. За этим следует поиск деформации с помощью подхода SBAS, в котором инверсия фазы выполняется с использованием минимизации нормы L1, которая является более устойчивой к типичным ошибкам развертывания фазы, встречающимся в городских районах.

Использовались данные TerraSAR-X на территорию Германии для демонстрации эффективности этой новой технологии в сельской местности.

Для мониторинга месторождений итальянские ученые усовершенствовали метод SBAS (Bateson et al., 2015). Спутниковая радиолокационная интерферометрия является документально подтвержденным методом для характеристики движений грунта на больших пространственных территориях. Тем не менее, плотность измерений часто ограничена

использованием земли, при этом наилучшие результаты получены в городских и полугородских районах. Используя реализацию методологии SBAS, в соответствии с которой области с неустойчивой согласованностью рассматриваются наряду с областями, демонстрирующими полную согласованность, в конечном счете для характеристики движения грунта над угольным полем Южного Уэльса, Соединенное Королевство (рис. 13).

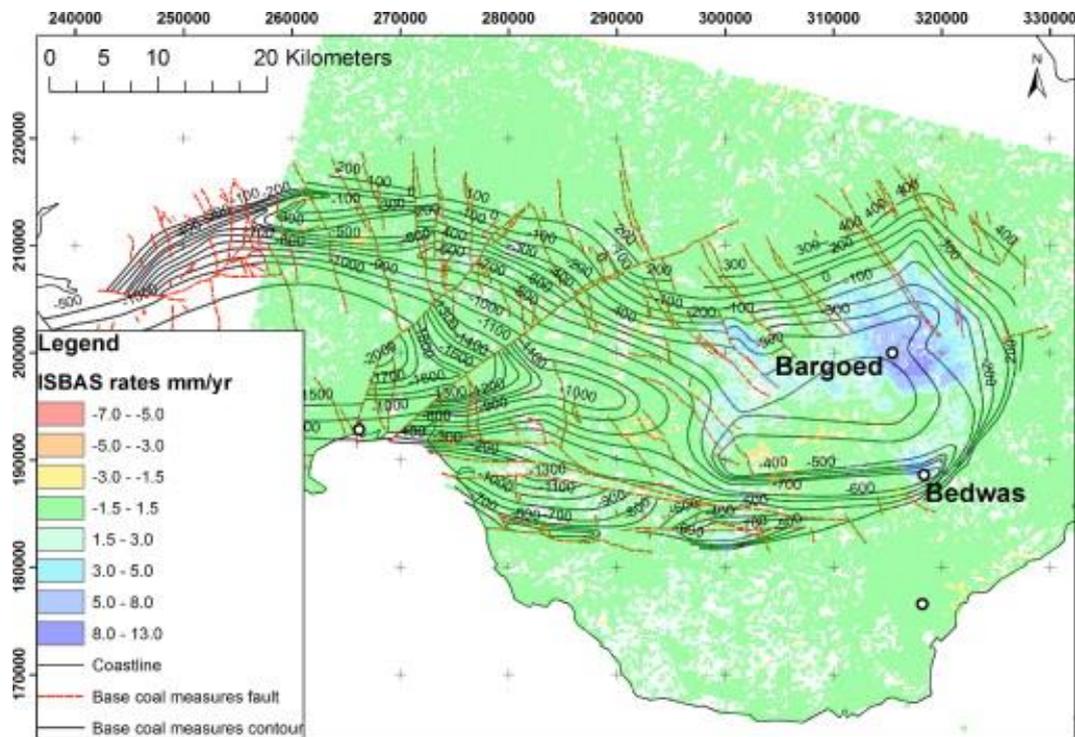


Рис. 13. Движение грунта над угольным полем Южного Уэльса (Bateson et al., 2015)

55 снимков, полученных ERS-1/2 за период между 1992 и 1999 гг. Обработываются с использованием метода ISBAS (прерывистым режимом SBAS), который обеспечивает в 3,4 раза больше целей с соответствующими измерениями, чем стандартный SBAS реализация. Доминирующей чертой наблюдаемых движений является относительно большая пространственная область поднятия. Скорость поднятия составляет целых 1 см / год и сосредоточены в той части угольного месторождения, которое эксплуатировалось совсем недавно. Геологическая интерпретация показывает, что этот подъем, скорее всего, является результатом восстановления шахтных вод. В угольных шахтах в этой части угольного месторождения требовалась перекачка грунтовых вод для обеспечения безопасной добычи угля; после их закрытия насосная деятельность перестала позволять уровням воды возвращаться к равновесию. Метод ISBAS предлагает значительные улучшения в плотности измерений, обеспечивая увеличение обнаружения движений поверхности и облегчая интерпретацию.

Интерферометрия постоянных рассеивателей PSI

Метод «стабильных/устойчивых отражателей» заключается в совместной обработке фазовой информации от отдельных объектов земной поверхности с геометрическими размерами меньше элемента разрешения РСА, яркостью, значительно превышающей фоновую, и постоянно наблюдаемых на снимках вне зависимости от погодных условий или времени года. Как правило, к таким объектам относятся элементы искусственных сооружений, по характеру обратного рассеяния соответствующие уголкового отражателям. Метод используется для долговременного мониторинга смещений поверхности, количество обрабатываемых пар при этом составляет десятки или даже сотни (Photomod Radar, 2019).

Потенциал РСА очень высоким разрешением для метода устойчивой интерферометрии отражателей в городских районах был подробно рассмотрен в 2004 году немецкими учеными (Gernhardt et al., 2010). По их мнению, интерферометрия постоянных отражателей (PSI) переросла в устоявшийся метод обнаружения крупномасштабных и мелкомасштабных деформационных явлений в городских районах и техногенной инфраструктуры. Деформационные режимы, возникающие при добыче нефти, газа или воды, хранении газа под землей, секвестрации CO₂, загрузке плотин и дамб и добыче полезных ископаемых, являются яркими примерами исследований, которые были успешно проведены с применением метода PSI для стеков данных ERS или ENVISAT. Из-за разреженного пространственного распределения постоянных отражателей (PS) и умеренного разрешения упомянутых спутников, как правило, было невозможно отследить источник рассеяния в деталях. Использование PS также носило оппортунистический характер, то есть мониторинг PSI отдельных зданий или отдельных частей инфраструктуры не всегда гарантировался. Эта ситуация кардинально меняется, если PSI применяется к данным очень высокого разрешения, полученным от современных радиолокационных спутников, таких как TerraSAR-X или COSMO-SkyMed. Например, TerraSAR-X способен доставлять изображения с разрешением до 1 м по азимуту и 0,6 м в наклонном диапазоне при работе в так называемом режиме прожектора с высоким разрешением с полосой пропускания 300 МГц. Данные такого типа предоставляют гораздо больше деталей об отдельных объектах и в то же время гораздо более высокие плотности PS. По сравнению с данными типа ERS или ENVISAT, плотность PS может увеличиться в 100-200 раз на той же области. Это обусловлено физическим фактом, что при более высоком разрешении и более короткой длине волны небольшие рассеиватели (например, трехгранники) демонстрируют более высокое отношение сигнал / помеха. Часто на одном большом фасаде или крыше здания можно найти от нескольких десятков до более ста PS.

Таким образом, отдельные здания и инфраструктура могут контролироваться с точки зрения структурной нагрузки и сезонной деформации, что также поддерживается коротким периодом повторного посещения TerraSAR-X всего 11 дней. Помимо разрешения, плотность этих точек также зависит от дополнительных параметров сбора данных, таких как угол падения или поляризация, а также от трехмерной (3D) структуры данной сцены, поскольку области областей размещения и тени тесно связаны с геометрической конфигурацией (рис. 14).

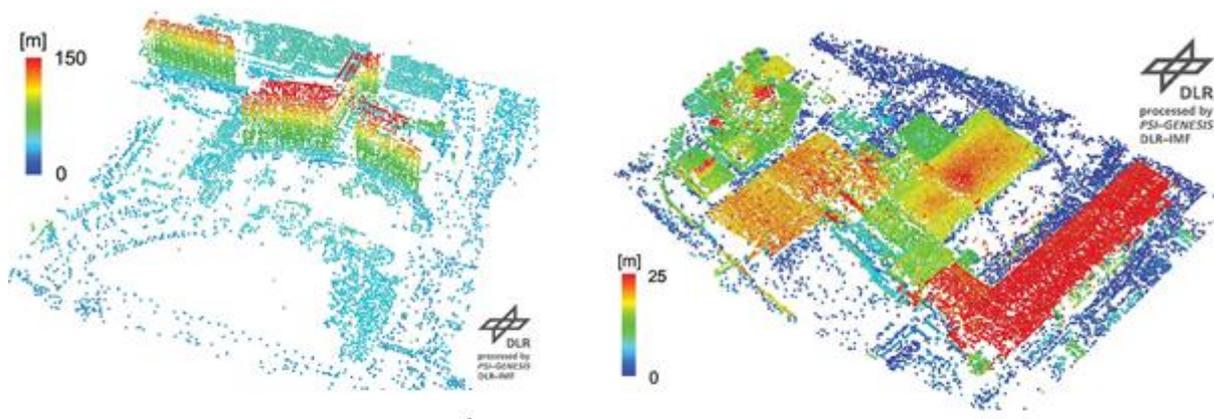


Рис. 14. Цвет указывает высоту точек над землей от 0 м (синий) до 150 м (красный) (Gernhardt et al., 2010)

Метод устойчивых отражателей, разработанный А. Ferretti

Основная идея метода устойчивых отражателей состоит в идентификации пикселей РСА-изображения, содержащих так называемые устойчивые отражатели — обратно рассеивающие элементы, для которых характерно слабое изменение значения когерентности на протяжении длинных временных интервалов (Ferretti, 2000). Если, как это обычно бывает, размеры устойчивых отражателей не превосходят размеров элемента разрешения, то значение когерентности является приемлемым даже для тех интерферограмм, для которых база интерферометра близка к критическому значению. При этом в интерферометрические расчеты можно включить весь доступный набор РСА-снимков. Идентификация устойчивых отражателей в серии радарных изображений позволяет оценить атмосферные помехи и устранить их из дифференциальных интерферограмм, что повышает точность оценок смещений земной поверхности (Ferretti, 2007).

Метод устойчивых отражателей, разработанный А. Hooper

А. Хупер предложил метод (Hooper, 2004), в котором проводится анализ распределения устойчивых отражателей по пространству. Этот метод свободен от гипотез о том, как меняется скорость смещения во времени. Это важно потому, что для многих природных объектов характер изменения скорости смещения во времени не известен, но должен быть

определен по данным спутниковой интерферометрии. Например, деформации на вулканах и в областях развития оползневых процессов происходят во времени не равномерно. Этот метод реализован в пакете StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) и предназначен для выделения устойчивых отражателей на природных объектах, где интенсивность отражения существенно ниже (при этом хорошо выделяются также и техногенные объекты). После идентификации устойчивых отражателей, проводится их обработка, в частности применяется фильтрация, позволяющая эффективно подавить атмосферные помехи (Дмитриев, 2013).

Идея метода состоит в следующем. Фаза дифференциальной интерферограммы (фазовый сдвиг некоторого пикселя на двух интерферометрических изображениях), после введения поправки за топографию, есть сумма фазовых смещений за счет движения отражающей площадки за время между съемками в направлении LOS, плюс фазовый сдвиг за счет ошибки в ЦМР и в определении орбиты, плюс смещение, связанное с изменением в атмосфере плюс шум (термический шум аппаратуры и ошибки в корегистрации). Устойчиво отражающим считается пиксель, в котором последние шумы малы. Однако определить величину шумов трудно, поскольку они маскируются компонентами, связанными с ЦМР, орбитами и атмосферой. Для решения этой проблемы предполагается, что характерный пространственный масштаб изменения компонент, связанных с деформациями земной поверхности, с орбитами и атмосферой, существенно больше характерного пространственного масштаба изменения аппаратурных и атмосферных шумов и ошибок, вызванных неточной ЦМР. Поэтому если провести осреднение фазы в круге некоторого достаточно большого радиуса и вычесть среднее, то в полученной разности будет доминировать вклад аппаратурных и атмосферных шумов и ошибок в ЦМР. Фазовый сдвиг, связанный с ошибкой в ЦМР, прямо пропорционален величине перпендикулярной базовой линии. Поскольку эта величина известна для каждой пары снимков, можно оценить коэффициент линейной регрессии и устранить ошибку из-за неточности ЦМР. Таким образом, удается выделить компоненту, связанную с аппаратурными и атмосферными процессами. Те пиксели, в которых дисперсия этой компоненты мала, и считаются устойчивыми (Hooper et al., 2004).

Для реализации этого алгоритма надо знать, где располагаются устойчиво отражающие площадки и в их окрестности проводить осреднение. Поскольку априори положение площадок неизвестно, алгоритм применяется итерационно.

Интерферометрический анализ точечных целей ИРТА

Интерферометрический точечный целевой анализ (ИРТА) — это метод использования временных и пространственных характеристик интерферометрических сигналов,

собранных с точечных целей, для точного отображения истории деформации поверхности, высоты местности и относительных задержек в атмосферных трассах.

Китайскими учеными было проведено исследование оседание грунта, вызванное, в основном, чрезмерной эксплуатацией подземных вод и других подземных ресурсов, таких как нефть, газ и уголь, что происходит во многих городах Китая (Zhang et al., 2011). Ежегодные потери из-за оседания земной поверхности по всей стране, по оценкам, превышают 100 миллионов долларов. В городских районах существует большое количество естественных стабильных радиолокационных отражателей, таких как здания и инженерные сооружения, в которых радиолокационные сигналы могут оставаться когерентными в течение длительного промежутка времени. Интерферометрический точечный анализ цели (IPTA) основан на этих отражателях. Предложенная методика применяется для картографирования оседания грунта в городе Сучжоу, провинция Цзянсу, Китай (рис. 15). Тридцать четыре сцены SAR ERS-1/2 проанализированы и получена информация о деформациях по 38 881 точечным целям в период между 1992 и 2000 гг. Оценки деформации, полученные из IPTA, хорошо соответствуют измерениям геодезическими методами — нивелирования, демонстрируя потенциал предлагаемой методики мониторинга оседания, основанной на IPTA.

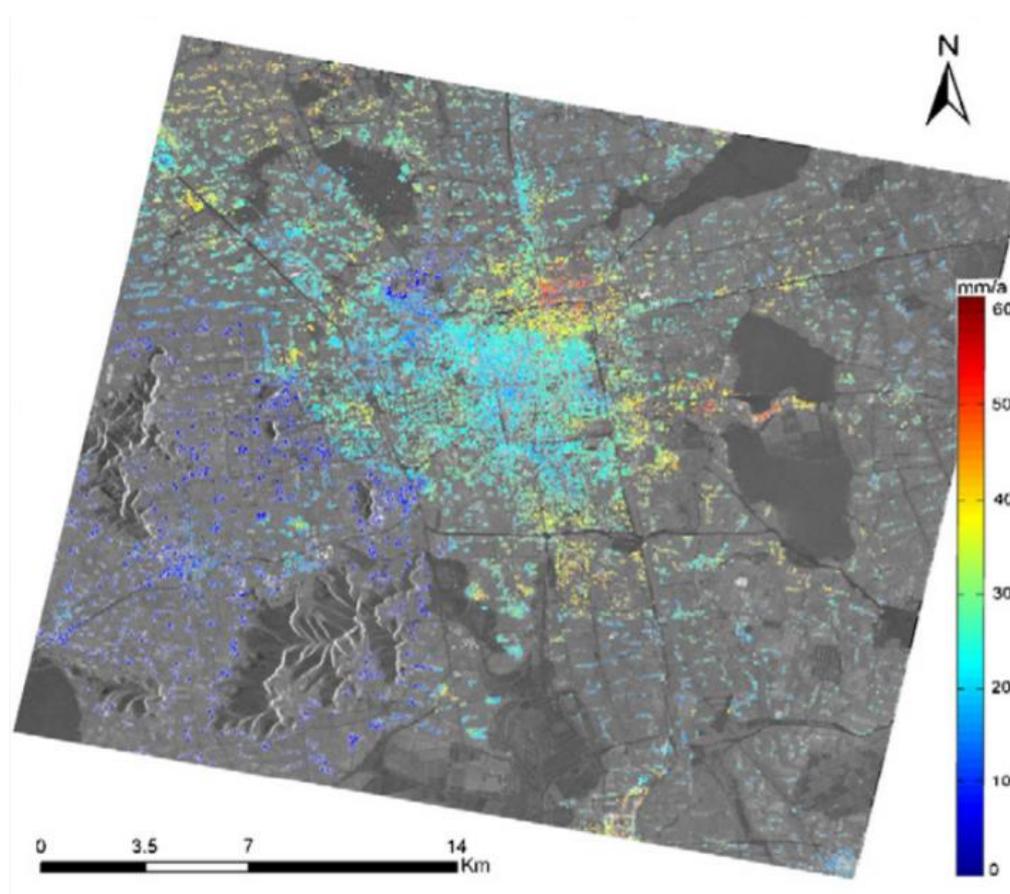


Рис. 15. Оседания грунта в городе Сучжоу, провинция Цзянсу, Китай (Zhang et al., 2011)

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УРБАНИЗИРОВАННЫХ РАЙОНАХ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ SENTINEL 1

3.1 Общие сведения о КА Sentinel 1 и его сенсорах

3 апреля 2014 г. на орбиту был выведен спутник Sentinel-1A (рис. 16), а 26 апреля 2016 года — его близнец Sentinel-1B. Спутники осуществляют радиолокационную съёмку в С-диапазоне с круглосуточной поставкой космических снимков.



Рис. 16. Спутник Sentinel-1A (официальный сайт Европейского космического агентства, 2017)

Sentinel-1A и Sentinel-1B были запущены в рамках проекта Copernicus (Copernicus Programme, 2018). Спутники Sentinel-1A и Sentinel-1B по своим техническим характеристикам практически идентичны и работают на орбите совместно (табл. 3) (Sentinel-1 User Handbook, 2016). Разработаны компанией «Thales Alenia Space», которая отвечала за проектирование, разработку и интеграцию аппарата.

Таблица 3

Технические характеристики КА Sentinel-1

Наименование КА	Sentinel-1A, Sentinel-1B
Страна	Италия
Разработчики	Thales Alenia Space Italy, Airbus Defence and Space
Оператор	ESA
Дата запуска	03.04.2014 (Sentinel-1A), 26.04.2016 (Sentinel-1B)
Ракета-носитель (РН)	Союз-2 (Россия)
Стартовая площадка	космодром Куру
Орбита:	Солнечно-синхронная
высота, км	693
наклонение, град	98,1
Срок активного существования, лет	7
Период повторного наблюдения, сутки	1-3
Мощность, Вт	5300
Размер КА, м×м×м	3,9 x 2,6 x 2,5
Масса КА, кг	2280

Радиолокатор КА Sentinel-1 функционирует в четырёх режимах, различающихся технологией съёмки, шириной полосы захвата, пространственным разрешением получаемых изображений и возможностями съёмки в разных поляризациях (табл. 4).

Таблица 4

Режимы съёмки радиолокатора КА Sentinel-1A (Балдина и др., 2016)

Режим	Ширина полосы захвата, км	Пространственное разрешение (без дополнительной обработки), м	Поляризация (Н– горизонтальная; V– вертикальная)
Stripmap (SM) – маршрутный	80	5x5	HH, VV, HH+HV, VV+VH
Interferometric Swath (IW) –	250	5x20	HH, VV, HH+HV, VV+VH

интерферометрический широкозахватный			
Extra-Wide Swath (EW) – сверх- широкозахватный	400	20x40	HH, VV, HH+HV, VV+VH
Wave (WV) – волновой	20x20	5x5	HH, VV

Принцип проведения съёмки в разных съёмочных режимах схематично показан на рис. 17.

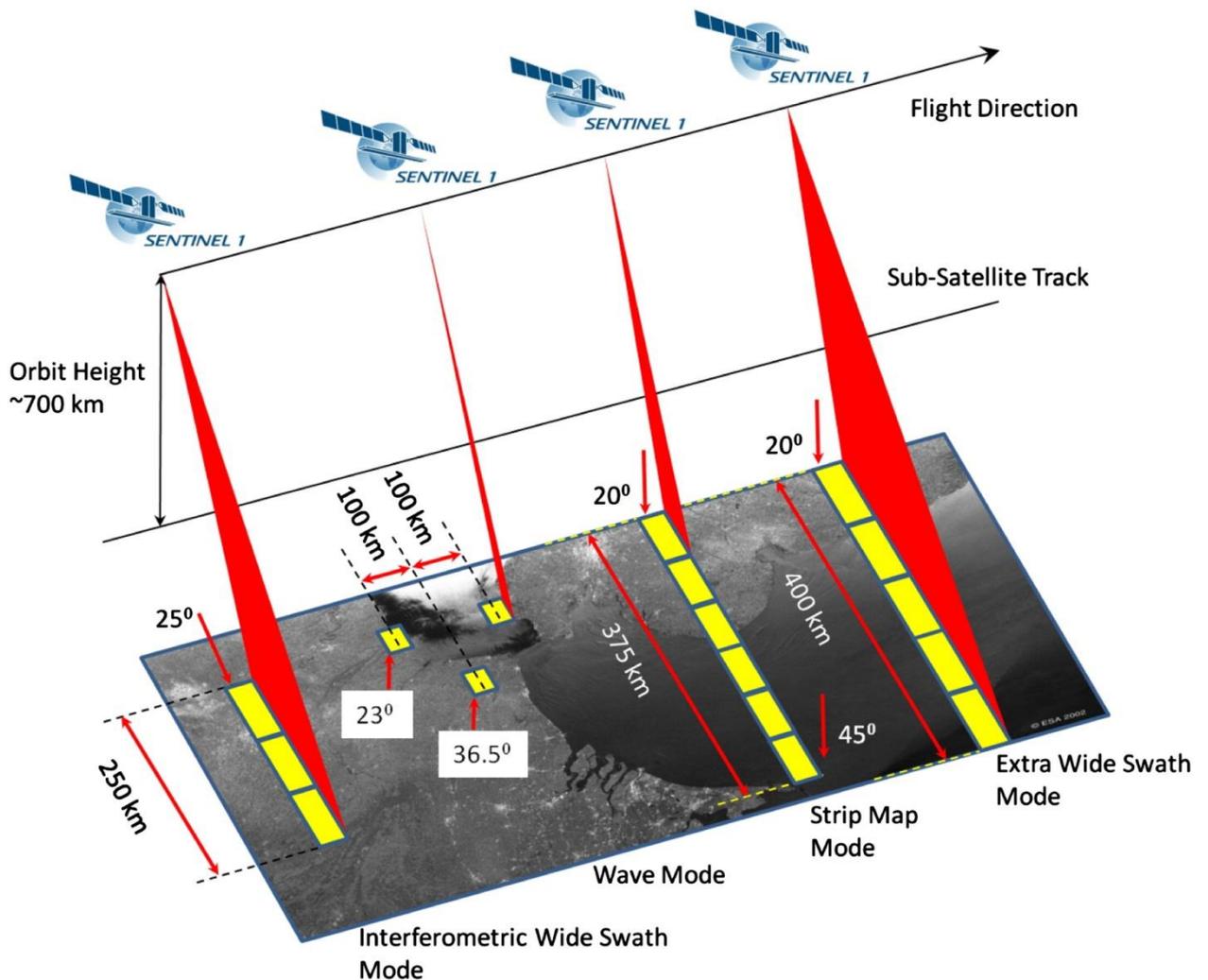


Рис. 17. Принцип проведения съёмки в разных съёмочных режимах (Sentinel-1 User Handbook, 2016)

Съёмка ведётся перпендикулярно к направлению пути только с правого борта. В маршрутном режиме (SM) обеспечивается непрерывная съёмка территории в пределах полосы шириной 80 км в одном из шести диапазонов углов. Съёмка в этом режиме, обеспечивающая получение данных с наилучшим пространственным разрешением (5×5 м), используется только при чрезвычайных ситуациях.

Широкозахватный интерферометрический режим (IW) реализуется при использовании технологии съёмки TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans SAR), являющейся разновидностью широкозахватного режима ScanSAR. В основе этой технологии лежит переключение зондирующего луча не только в направлении дальности, но и его перемещение вперёд и назад в азимутальной плоскости. За счёт съёмки в трёх рядах по дальности обеспечивается полоса захвата шириной 250 км. Режим IW является основным для съёмки поверхности суши.

Сверх-широкозахватный режим (EW), также использует технологию съёмки TOPSAR. Съёмка ведётся в пяти рядах в направлении дальности, ширина полосы захвата увеличивается до 400 км. Режим EW предназначен для наблюдения за полярными областями, морским льдом, отдельными участками Мирового океана в целях мониторинга загрязнений и решения других задач.

В волновом режиме Wave (WV) съёмка осуществляется поочередно в ближней (при угле падения излучения 23°) и дальней ($36,5^\circ$) зонах. При этом формируются кадры размером 20×20 км, а расстояние между кадрами, полученными в одной зоне, составляет 200 км. Этот режим предназначен для съёмки Мирового океана (*Sentinel-1 User Handbook, 2016*).

3.1.1. Уровни обработка данных

Продукты разных уровней начальной обработки, формируемые на основе данных Sentinel-1, распространяются через веб-портал Sentinel Data Hub (Copernicus Open Access Hub, 2017). В архиве доступны для скачивания данные с октября 2014 г. (Балдина, 2016). Пространственные разрешения зависят от режима сбора данных и уровня обработки.

Уровень-0

Продукты нулевого уровня — RAW (радиоголограмма) — «сырые» данные. Для того чтобы эти данные можно было использовать, их нужно декомпрессировать и обработать, используя программное обеспечение для фокусировки.

Уровень-1

Данные первого уровня выпускаются как Single Look Complex (SLC) и Ground Range Detected (GRD).

Продукты SLC – это комплексные радиолокационные данные, то есть содержащие амплитуду и фазу сигнала. Продукты состоят из ориентированных данных РЛИ, имеющих географическую привязку с использованием данных орбиты и положения спутника и предоставляемых в геометрии с нулевым доплеровским наклоном. Данные этого уровня используются в интерферометрической обработке для получения информации о высотах и смещениях зондируемой поверхности.

Продукты GRD могут быть в одном из трех разрешений (табл. 5):

- Полное разрешение (FR)
- Высокое разрешение (HR)
- Среднее разрешение (MR)

Таблица 5

*Детальность (размер пиксела) доступных изображений уровня обработки GRD, м
(Sentinel-1 User Handbook, 2016)*

Уровень де- тальности	Режим съемки		
	SM	IW	EW
Полный	4x4	-	-
Высокий	10x10		25x25
Средний	40x40		

Уровень-2

Второй уровень обработки представлен группой продуктов OCN (ocean), содержащих некоторые характеристики поверхности океана. Продукты этого уровня формируются на основе данных, полученных во всех четырех съёмочных режимах.

Таким образом, при выборе данных Sentinel-1 из архива имеет значение режим съёмки, уровень обработки данных, так как их параметры (охват, разрешение, поляризация, наличие фазы сигнала и т.д.) определяют площадь исследуемой территории, возможность решения задачи, в частности, масштаб картографирования.

3.2 Интерферометрическая обработка методом мультитременного DInSAR

ESA SNAP – это свободно распространяемое программное обеспечение для обработки космических снимков, разрабатываемое также Европейским космическим агентством (Sentinel Toolboxes).

Суть метода дифференциальной интерферометрии состоит в формировании модельной интерферограммы на основе модели рельефа и использовании ее совместно с реальной интерферограммой для получения дифференциальной интерферограммы. Для получения дифференциальной интерферограммы используются два изображения, одно из которых является основным (до предполагаемого смещения), а второе вспомогательным (после предполагаемого смещения).

Построения карты смещений можно разбить на три этапа:

- Коррегистрация
- Построение дифференциальной интерферограммы
- Формирование карты смещений

Режим интерферометрический широкозахватный (IW) захватывает 3 подполосы (swath) и 8 частично пересекающихся полигонов (bursts), потому что использует технологию съёмки TOPSAR. Поэтому перед Коррегистрацией выполняется Сплит (Split) для работы с конкретным участком.

Коррегистрация

Для коррегистрации изображений Sentinel 1 используется модуль TOPS для формирования интерферограммы. Снимки должны обрабатываться «burst by burst» и данный модуль был разработан для данных, полученных технологией TOPSAR. Описание формирования данной технологии описано в статье (Yagüe-Martínez et al., 2013).

- 1) Для оценки вертикальных смещений (оседаний) используют поляризацию ВВ (VV) (Руководство по обработке..., 2019) (рис. 18).

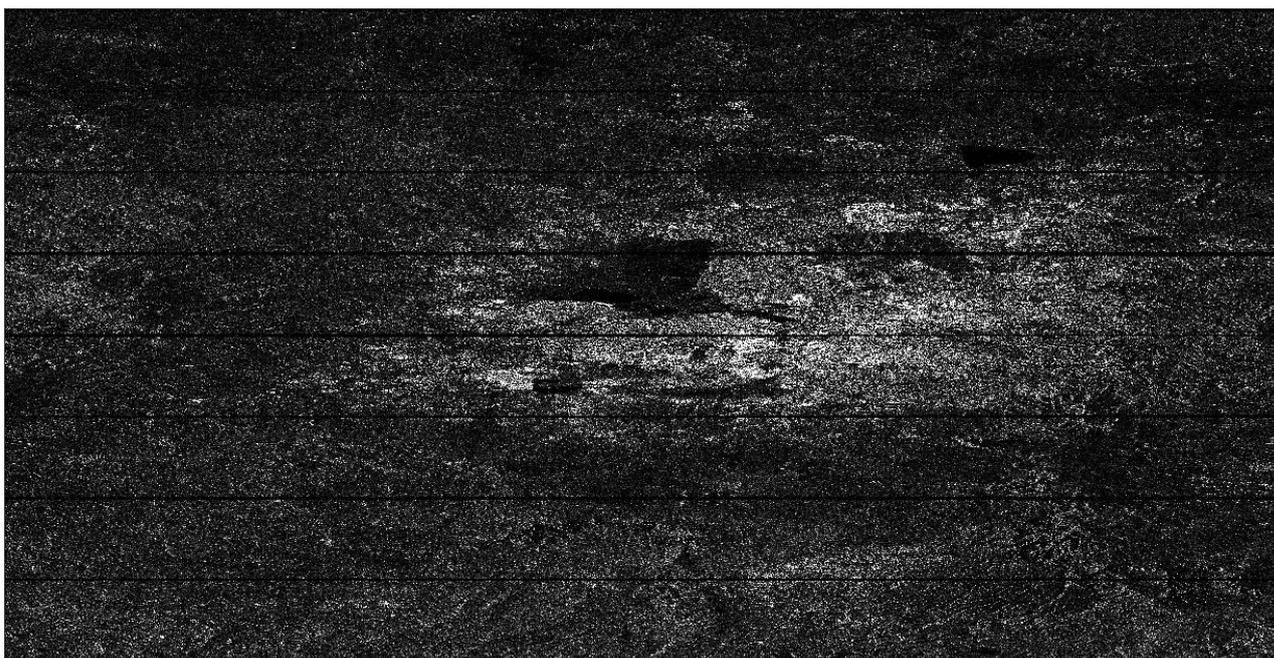


Рис. 18. Показатель интенсивности, поляризация ВВ (VV), г. Мехико, 6 июня 2016 год

- 2) Необходимым условием является использование файл точных орбит (Apply orbit file), оно выполняется при возможности его скачать, возможно продолжение обработки без скаченного файла.
- 3) После этого выполняется обратный геокодинг (back geocoding), который совмещает попиксельно оба изображения.

- 4) Далее выполняется расширенное спектральное разнесение (enhanced spectral diversity/ESD), необходимое для получения требуемой точной регистрации по азимуту.
- 5) Предпоследний шаг — это формирование интерферограммы (Interferogram). Интерферограмма является результатом комплексного перемножения мастер-изображения и подчиненного изображения. В результате перемножения формируется разностно-фазовая картина поверхности (Photomod Radar, 2019).
- 6) И завершающим шагом этого этапа является дебарстинг (TopSAR Deburst). Данный процесс объединяет отдельные всплески из одного подкадра в единую систему, где расстояние между азимутальными линиями является постоянным от начала до конца и не существует демаркации черной линии между субсеквенционными всплесками (Орынбасарова, Соутер, 2018)

В результате получаем разностную фазу между двумя изображениями (рис. 19) и карту когерентности (рис. 20).

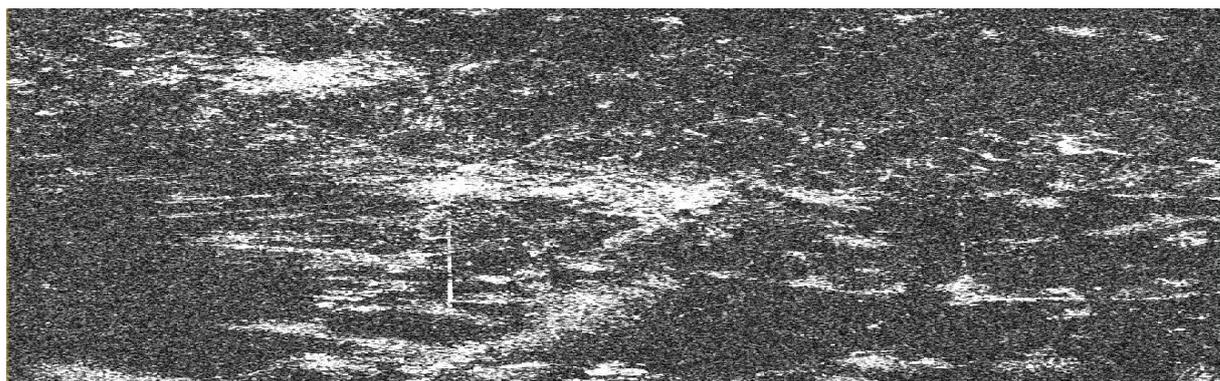


Рис. 19. Фрагмент г. Мехико 06.06.2016 и 04.09.2018, промежуточный результат обработки: разностная фаза

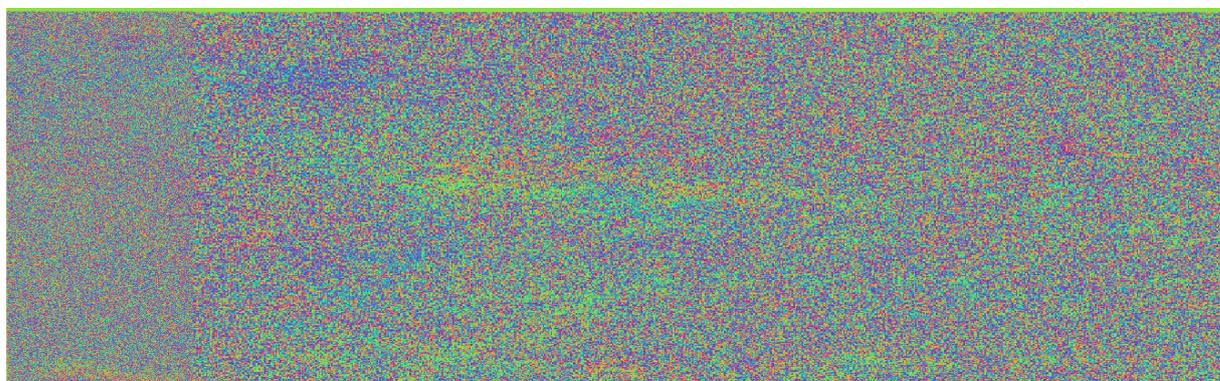


Рис. 20. Фрагмент г. Мехико 06.06.2016 и 04.09.2018, промежуточный результат обработки: карта когерентности

Когерентность — это параметр, характеризующий согласованность (корреляцию) значений основного и вспомогательного изображений. Близкое к единице значение когерентности говорит о хорошем соотношении сигнал/шум для интерференционной картины.

Значения когерентности:

0,0 – 0,3 — низкое. Характерно для областей интерферограммы, где происходят разрывы фазы;

0,3 – 0,5 — удовлетворительное. Характерно для участков с изменившимися за период между съемками электрическими характеристиками поверхности;

0,5 – 0,7 — хорошее;

0,7 – 1,0 — отличное.

Построение дифференциальной интерферограммы

Используя результат первого этапа, необходимо получить дифференциальную интерферограмму, другими словами, нужно избавиться от шумов — погрешностей за рельеф, аппаратуру и время.

Удаление из фазы влияние рельефа (Topo Phase Removal) выполняется, используя ЦМР. SNAP по умолчанию предлагает открытую ЦМР — SRTM.

Для радиолокационных изображений характерен высокий уровень флуктуационной погрешности, часто называемой спекл-шумом (Родионова, 1993). Он отображается на снимках, в виде случайно распределенных черно-белых пикселей на всей поверхности изображения. Это происходит по причине интерференции множества отраженных лучей, попадающих на каждый отсчет снимка. Однородная поверхность, например, как поле, покрытое травой, без спекл-шума на снимке отобразится в виде равномерного оттенка светло серого цвета. На самом деле лучи отраженные от каждого края травы, дают в результате в ячейках изображения пиксели различной яркости относительно среднего тона, и травяное поле отображается не равномерным тоном, а зашумленным (рис. 21) (Копенков, 2016).

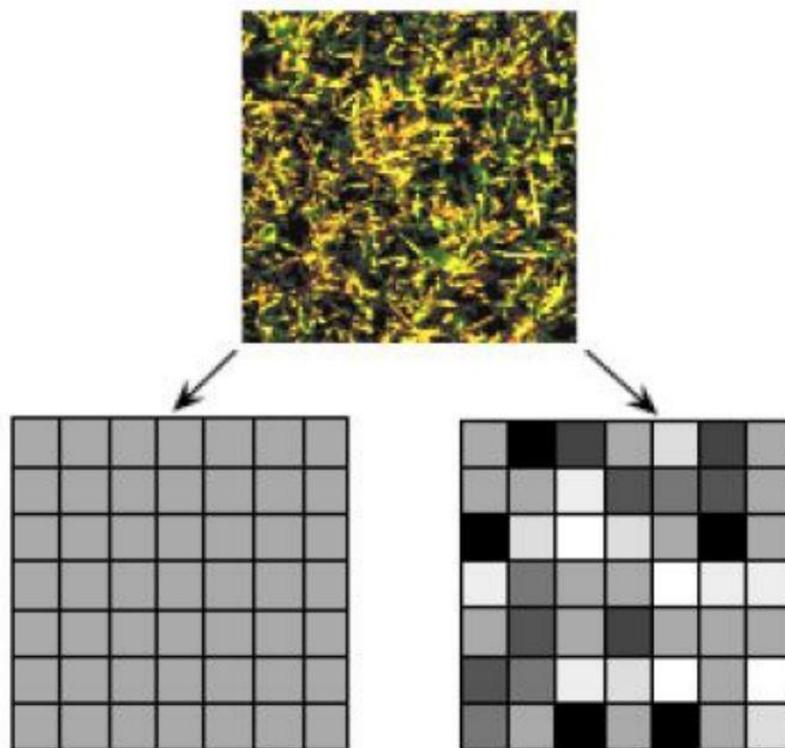


Рис. 21. Появление спекл-шума

Поэтому необходимо выполнить Мультилук (Multilook). Этот метод обработки является широко используемым для уменьшения спеклов в общепринятой теории интерпретации сигналов SAR. Он отличается от некоторых других передовых методов уменьшения спеклов, таких как фильтр Ли, метод вейвлетов, телевизионная регуляризация, как метод в процессе, несмотря на недостаток — ухудшение разрешения (Fang et al., 2013).

Мультилук используется при исследовании больших площадей, т.к. он существенно сокращает время развертки и других расчетов и при этом мало влияет на величины смещений (Руководство по обработке..., 2019).

После этого выполняется фазовая фильтрация Голдстейена (Goldstein Filtering). Это действие необходимо, чтобы эффективно использовать временную информацию мультивременного метода InSAR и обеспечить однородность пикселей в окне (Huang et al., 2018).

Полученные результат экспортируется в SNAPHU (*Snaphu Export*) — плагин, разработанный в Стэнфордском университете, используемый для развертки (восстановления) фазы (Chen et al., 2003).

В результате по фазе можно различить урбанизированные районы — пиксели одного цвета, находящиеся рядом и растительность, воду — это пиксели разных цветов, расположенные в разброс (рис. 22).

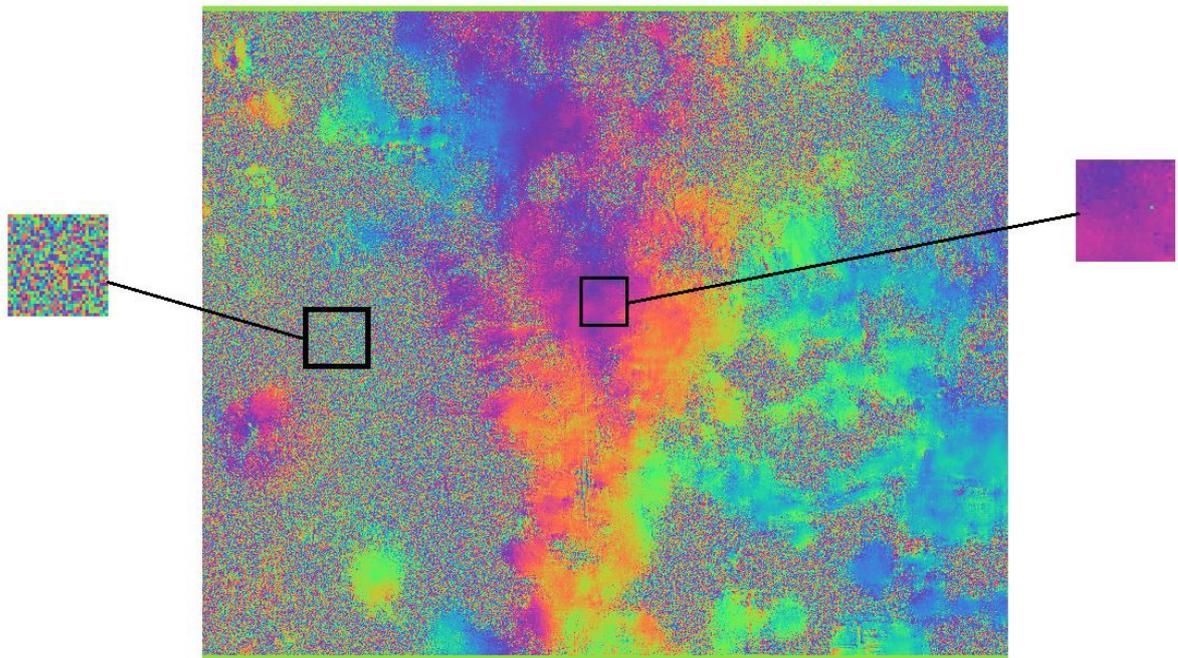


Рис. 22. Дифференциальная интерферограмма

Формирование карты смещений

Полученные после развертки фазы данные вновь загружаются в SNAP и выполняется преобразование фазы в смещение (*Phase to Displacement*).

Результатом ее выполнения является смещение в направлении линии прямой видимости радара (Line-of-sight, LOS) (рис. 23).

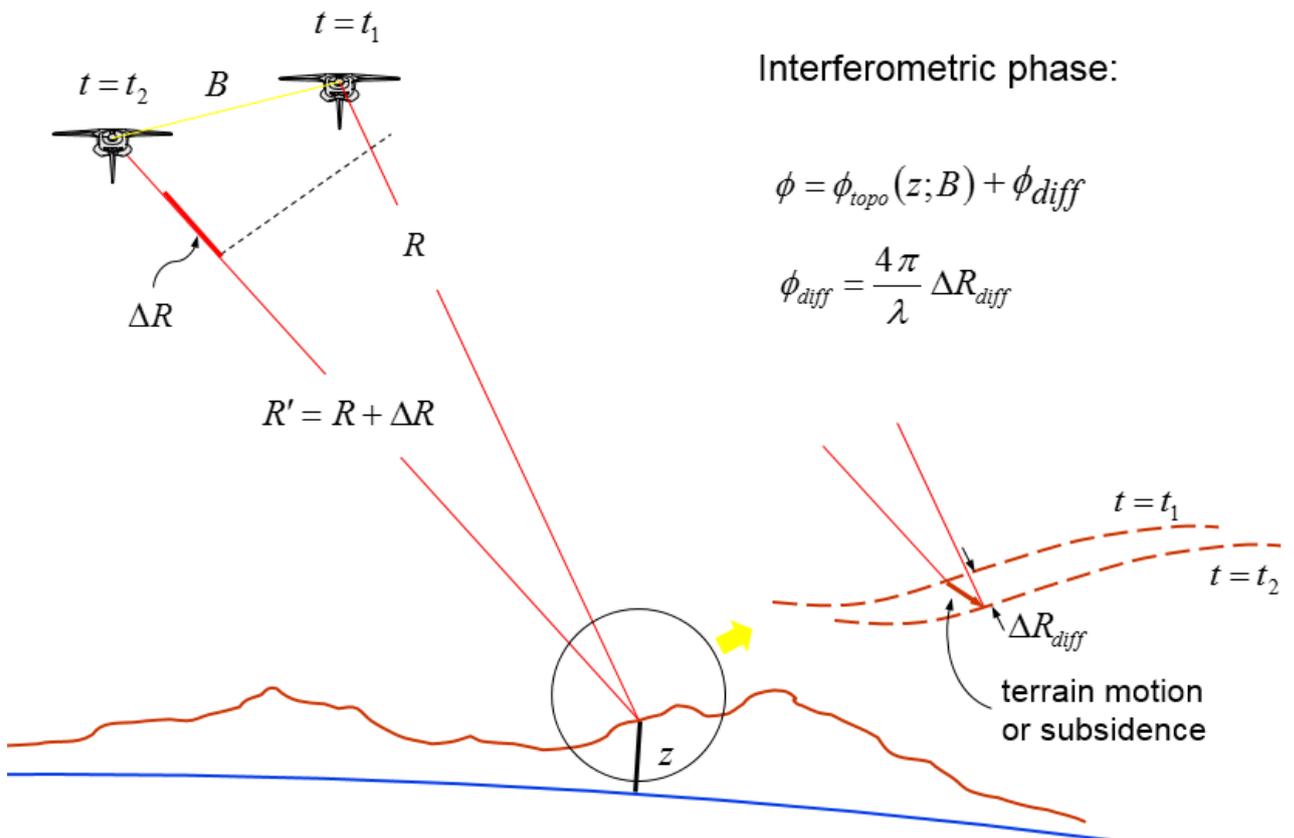


Рис. 23. Расчет смещения в направлении линии прямой видимости радара

Положительные значения LOS-смещений означают движение поверхности по направлению к радару (поднятие, uplift), отрицательные — движение от радара (понижение, subsidence) (DLR, 2019).

Расчет смещений представляет собой LOS-смещение, взятое со знаком "минус" и измеряемое в метрах (рис. 24).

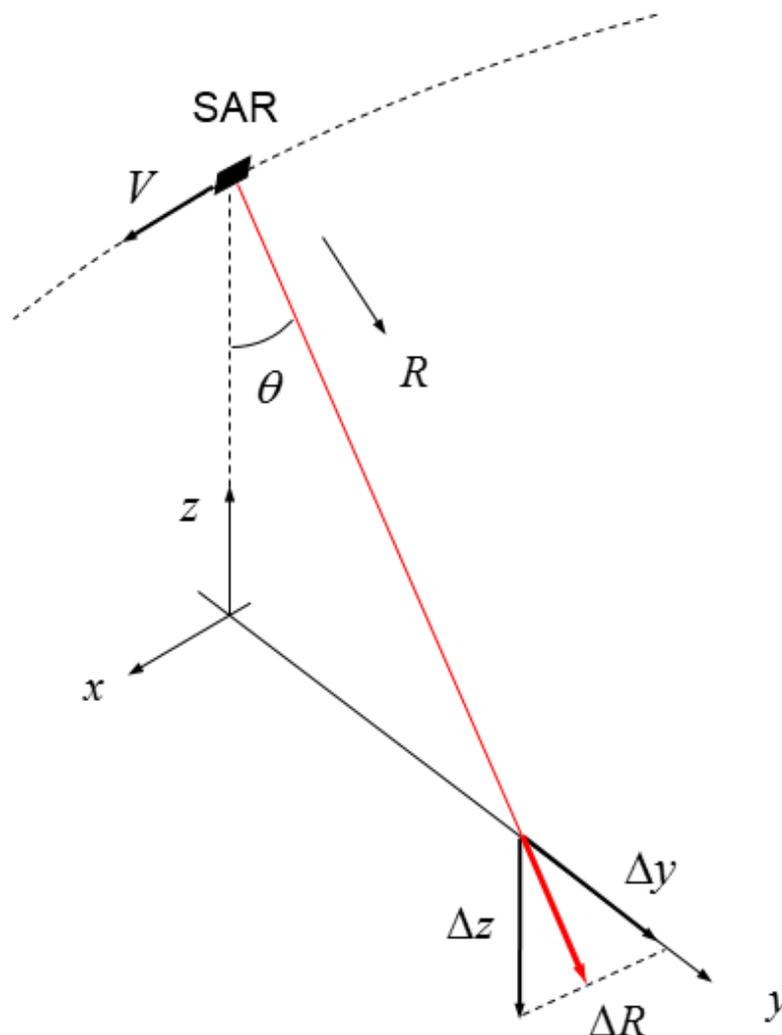


Рис. 24. Расчет вертикальных смещений поверхности

Завершающим действием является геокодирование матрицы высот (*Range-Doppler Terrain Correction*). Матрица абсолютных или относительных высот, полученная на этапе пересчёта абсолютных фазовых значений в высоту, на этапе геокодирования трансформируется в географическую систему координат: широта-долгота-высота над опорным эллипсоидом (WGS 84) и превращается в конечный результат двухпроходной интерферометрической обработки — карту смещений (Map of displacement VV) (Photomod Radar, 2019).

Автоматизация процесса обработки

Процесс интерферометрической обработки — это довольно длительный процесс с точным перечнем выбранных действий, которые соблюдаются в четкой последовательности. В программной среде Snap есть модуль, который позволяет собирать цепочки действий в модели — это Graph Builder. В результате последовательность приведенных этапов была автоматизирована с его помощью (Приложение 1).

3.2.2 Визуализация результатов и получение статистики в QGIS

После экспорта полученных смещений в GeoTiff его следует импортировать в QGIS для оформления результатов и расчета статистики.

Методом скользящего окна (рис. 25) ухудшается качество изображения, тем самым выделяются наиболее характерные смещения земной поверхности. Размер окна для серии изображений выбирается для серии карт опытным путем. Обычно используют окна 3x3 и 5x5.

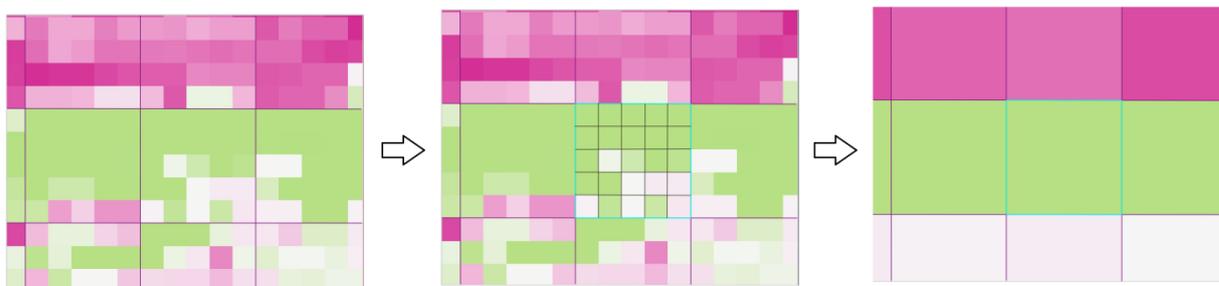


Рис. 25. Принцип работы метода скользящего окна

Для решения этой задачи используется встроенный модуль GRASS — «r.resamp.stats» (Перестраивает растровые слои в более низкое пространственное разрешение с помощью операции агрегирования). В качестве метода агрегирования используется «усреднение» (average).

Расчет статистики производится встроенными модулями QGIS, так же и в отдельный файл сохраняются графики оседаний по выбранным данным.

3.3 Апробация метода

Для апробации предложенного метода мониторинга оседаний был выбран фрагмент города Череповец.

Основной снимок (4 мая 2018 год):

S1B_IW_SLC__1SDV_20180504T035158_20180504T035225_010766_013AC9_5418

Подчиненный снимок (21 июня 2018 год):

S1B_IW_SLC__1SDV_20180621T035200_20180621T035227_011466_01510C_B17D

В результате обработки получилась площадь оседаний 10 и 20 км² с максимальной глубиной 3 см (рис. 26).

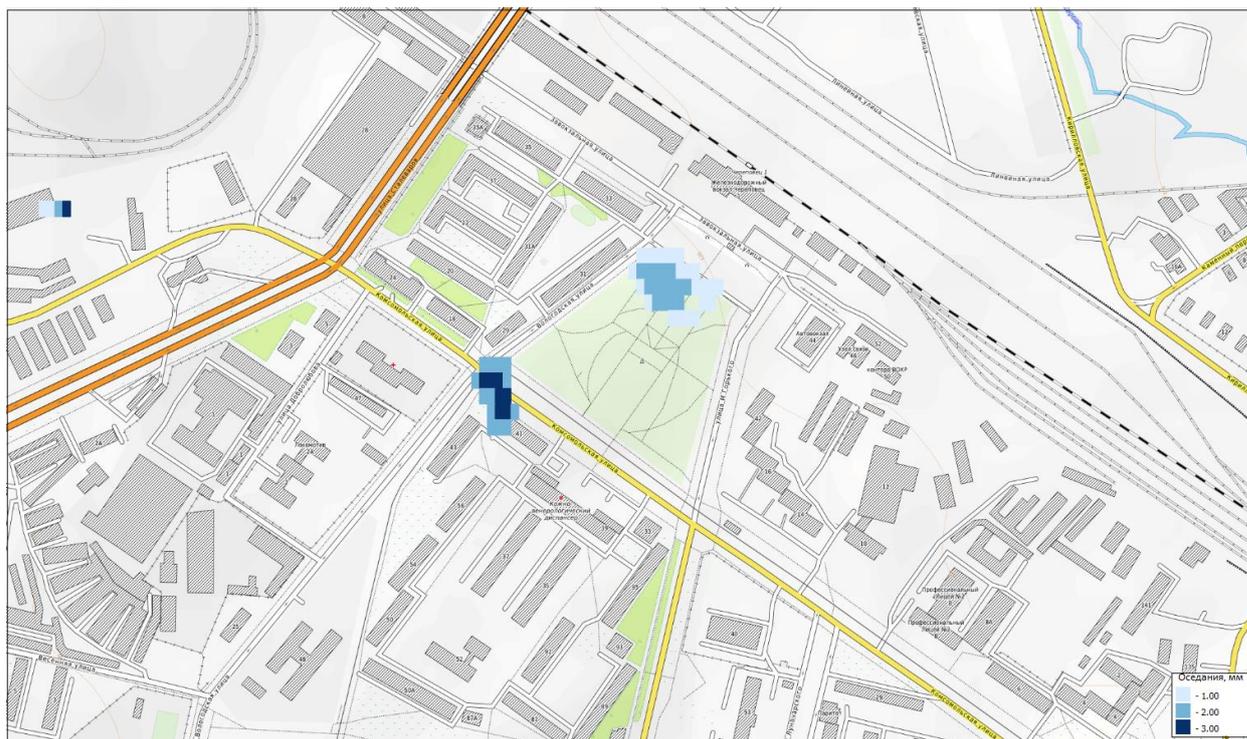


Рис. 26. Оседания грунта на территории г. Череповец за период 4.05.2018 – 21.06.2018

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УРБАНИЗИРОВАННЫХ РАЙОНАХ

4.1 Динамика оседаний земной поверхности на южной части города Санкт-Петербург

Данные

В связи с тем, что Коперник предоставляет данные на год свободно, а на более длительный срок для стран не входящих в состав Европейского Союза только по заявкам, даты мониторинга были установлены следующие: 11.06.2018 — 01.05.2019

Основной снимок: 11.06.2018

Движение спутника: нисходящие

Относительная орбита: 7

Тип продукта: SLC

Поляризация: VV

Режим съемки: IW

Полоса: 1

Полигоны: 5, 6, 7

Количество снимков составило 41 (Приложение 2) и объемом – 348,5 Гб. Охват территории снимка представлен на рис. 27.

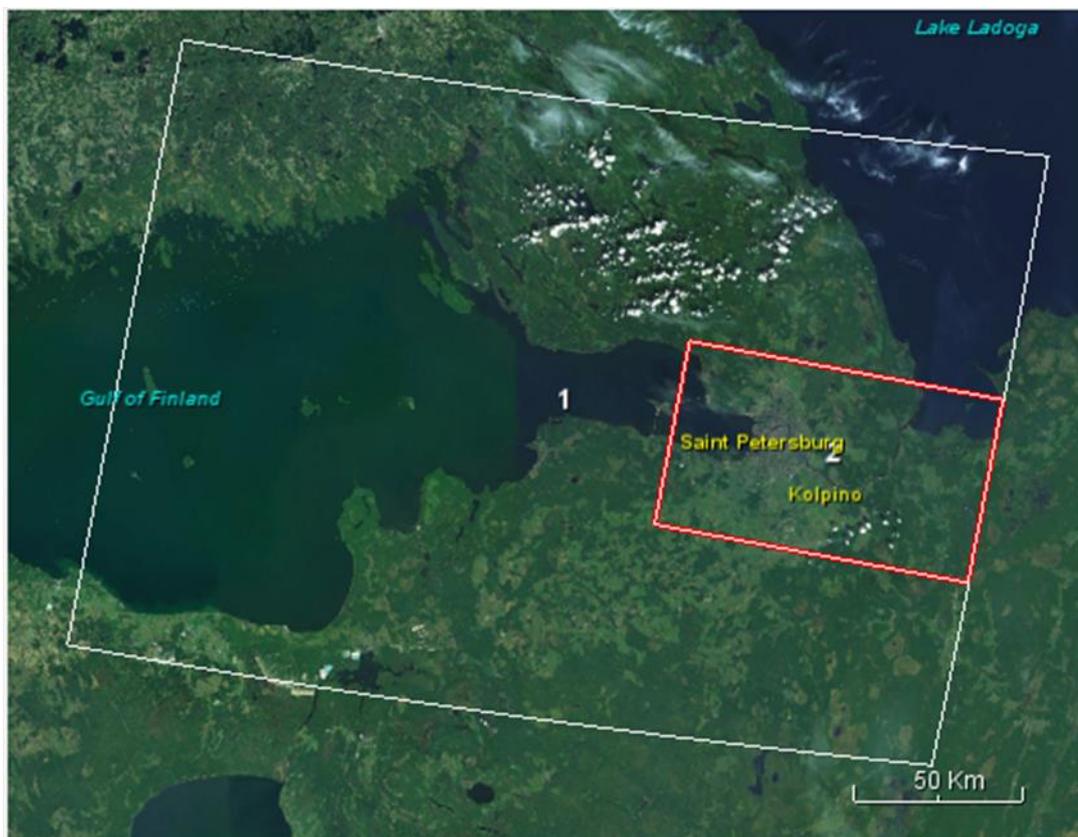


Рис. 27. Охват снимка – белая линия, территория мониторинга – красная линия

Обработка

Обработка выполнялась в операционной системе Linux Ubuntu со следующими системными требованиями.

Процессор: Octa-core или hexa-core Intel Core i7 CPU

Оперативная память: DDR3-1600 8 x 8 ГБ (всего 64 ГБ)

Видеокарта: Nvidia GeForce GTX 980 Ti

Время обработки составило порядка 40 часов.

Полученные результаты хранятся в файловой системе (рис. 28). Организация файлов направлена на упрощение последующей работы с данными или уточнение деталей. Каждый набор данных хранится в следующем виде: «ГГГГ_ДД_ММ», внутри находятся промежуточные результаты обработки, в папке «Processing», так же там хранится GeoTiff с приставкой к дате «..._dis_VV», что означает – смещения по вертикали.

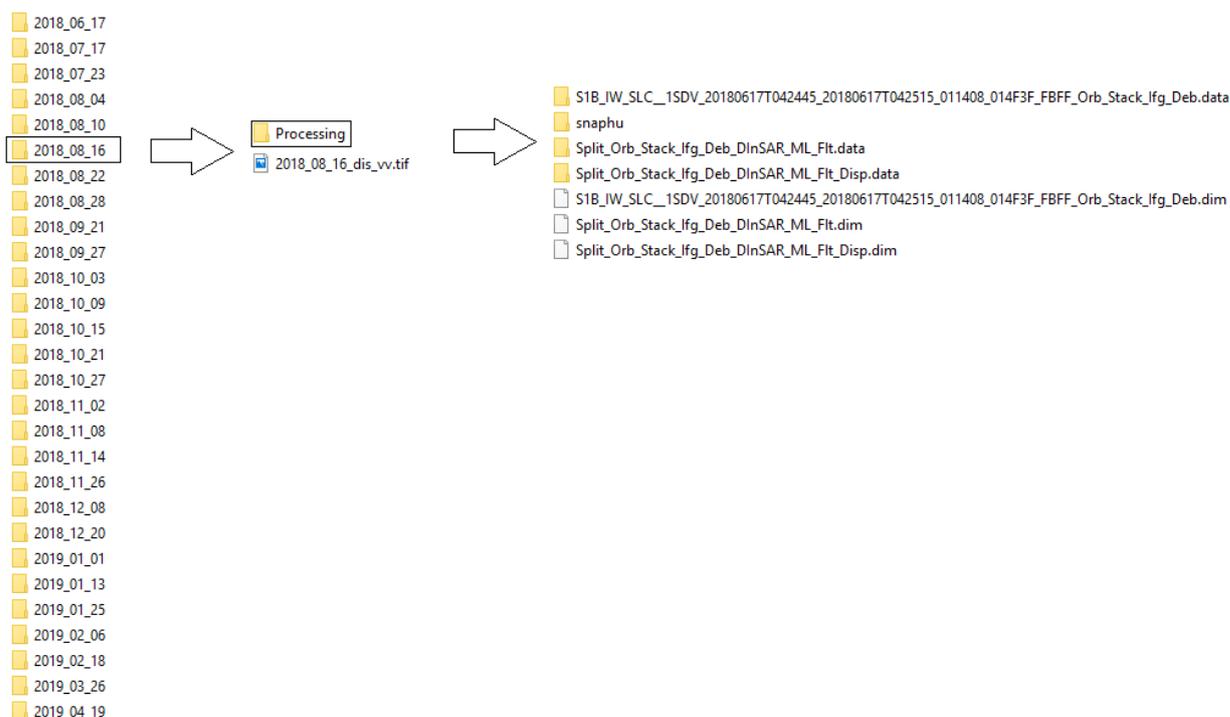


Рис. 28. Каталог обработанных данных

Визуализация

После обработки было получено 40 карт смещений, с которыми можно ознакомиться в приложении №3. Данный материал иллюстрируют локальные смещения земной поверхности в Санкт-Петербурге за прошедший год. Можно с точностью сказать, что нет аномальных мест, в основном они распределены по северной и южной частям города, где проходят строительные работы. Помимо этого, видны ремонтные работы и места аварий, связанных с прорывами подземных коммуникаций. Так на рис. 29 пример визуализации

экспортированных в GeoTiff смещений, где в качестве подложки использовались данные OpenStreetMap.

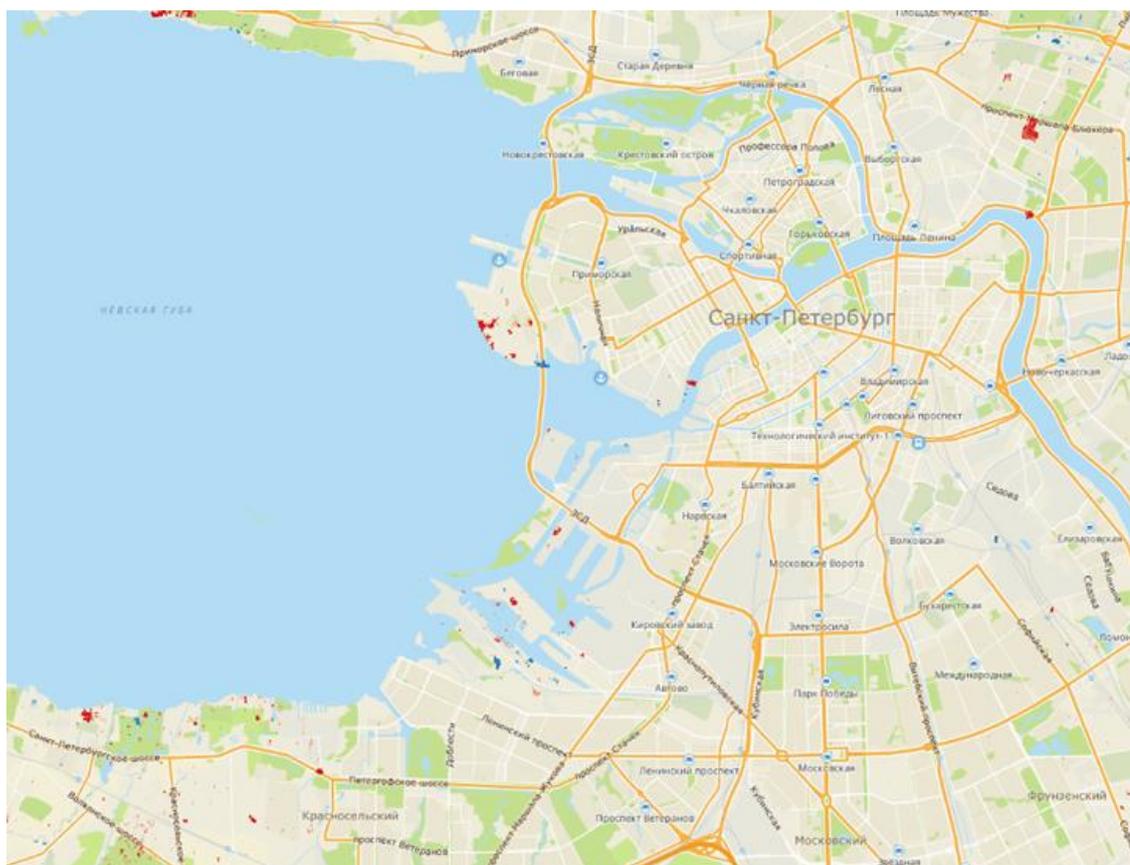


Рис. 29. Визуализация, полученных смещений

Одно из крупных оседаний произошло в связи с прорывом подземных коммуникация на ул. Замшина 9 июля 2018 года (рис. 30).

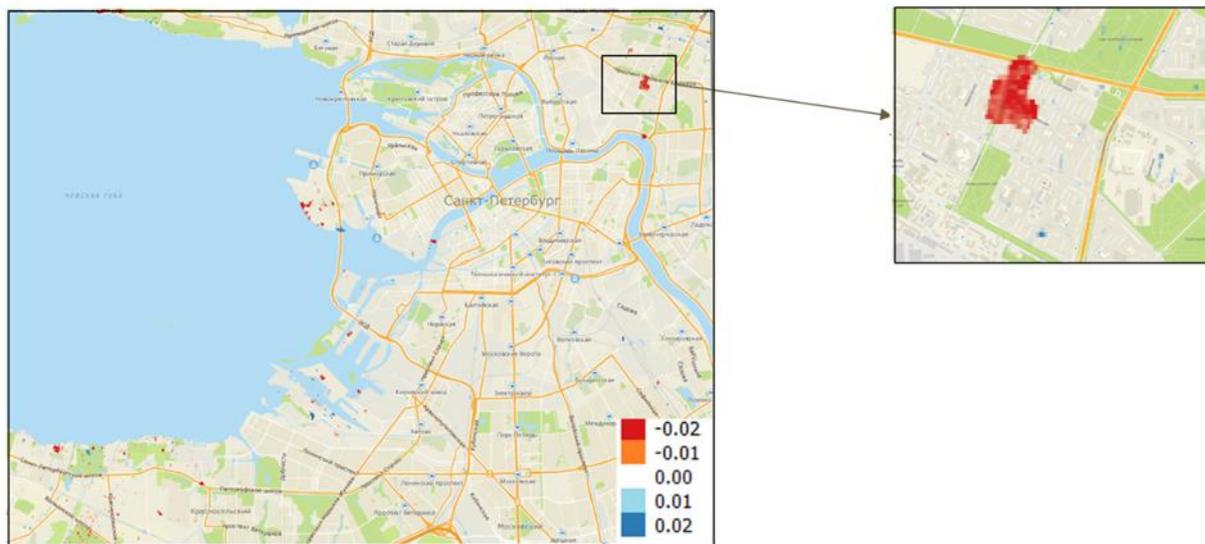


Рис. 30. Ремонтные работы на ул. Замшина 9 июля 2018 года

Интересен пример с южной частью города, в районе метро Купчино, где из-за прорыва трубы с горячей водой провалился автобус (рис. 31).



Рис. 31. Фотографии из новостной рубрики (РИА Новости)

На графике видна динамика (рис. 32), в течении 2-х месяцев в данном месте наблюдалось оседание гранта из-за просачивания горячей воды. Возможно, имея такую систему мониторинга удалось бы предотвратить чрезвычайную ситуацию.

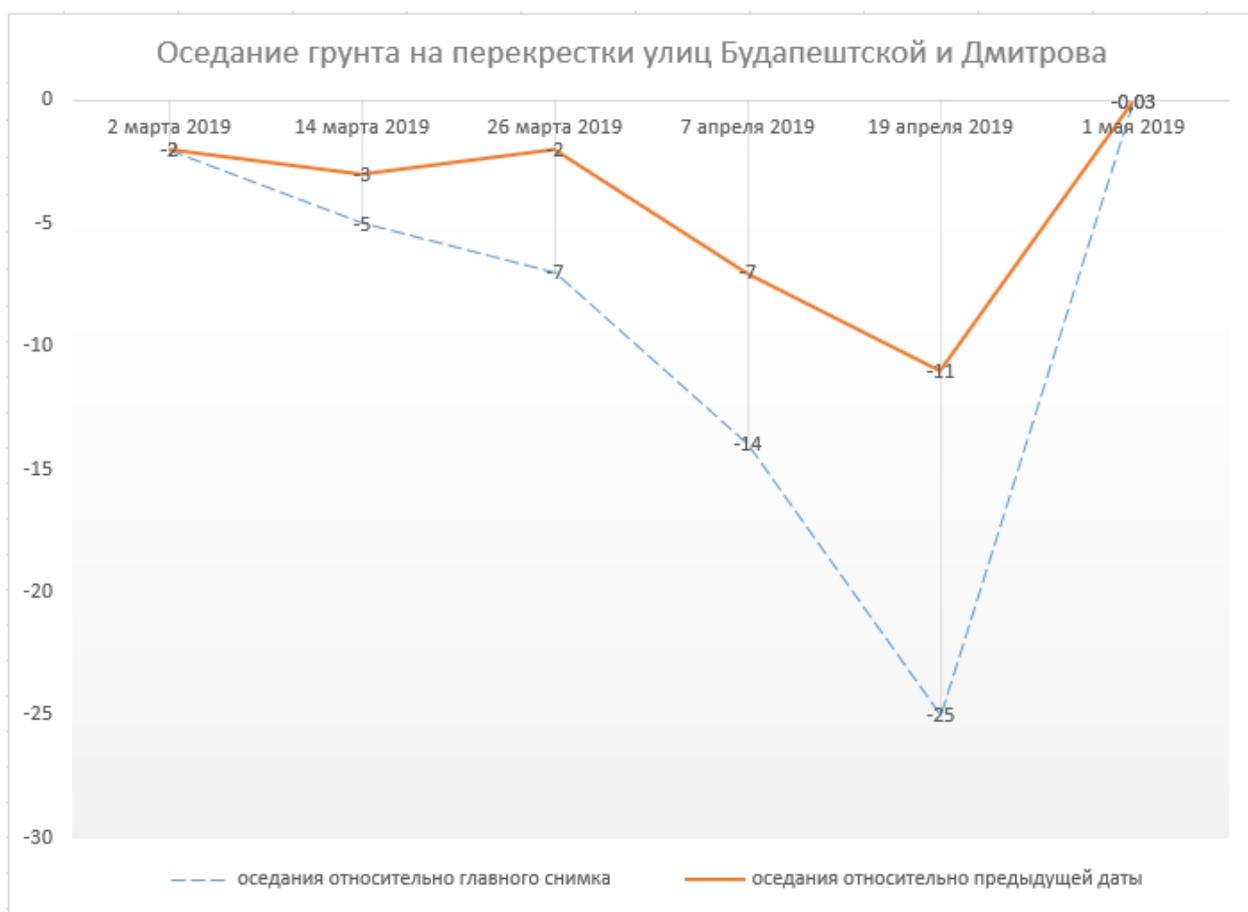


Рис. 31. График оседания грунта в период с 2.03.2019-1.05.20192

Повторяемость оседаний гранта можно представить на карта-схеме (рис. 33), где красными точками обозначены места с наибольшей встречаемостью пикселей с отрицательной высотой за выбранный период. Жёлтыми точками обозначены статичные места.

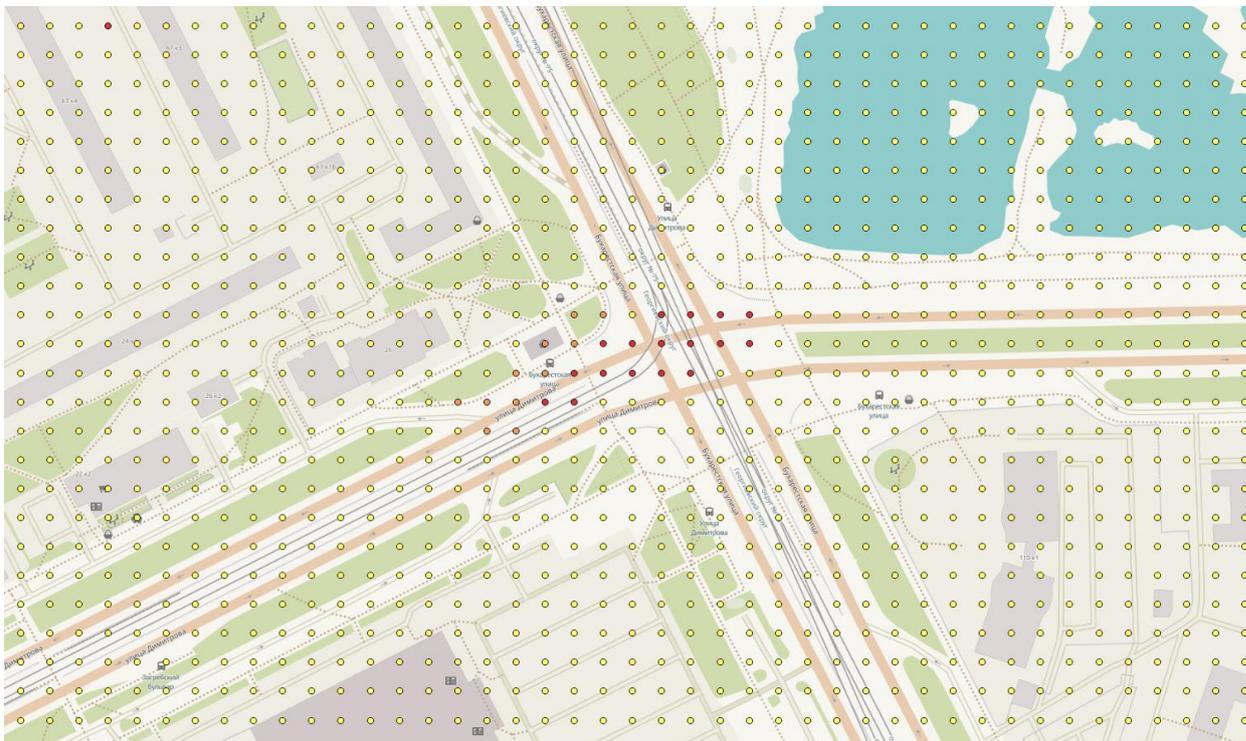


Рис. 32. Картосхема перекрестке улиц Будапештской и Димитрова с локализованными местами оседаний

4.2 Методические рекомендации по проведению мониторинга предложенным методом

4.2.1 Ключевые моменты обработки данных

Разработанную методику мониторинга можно представить в виде блок-схемы (рис. 34). Реализация проведена основываясь на открытых данных и открытом программном обеспечении.

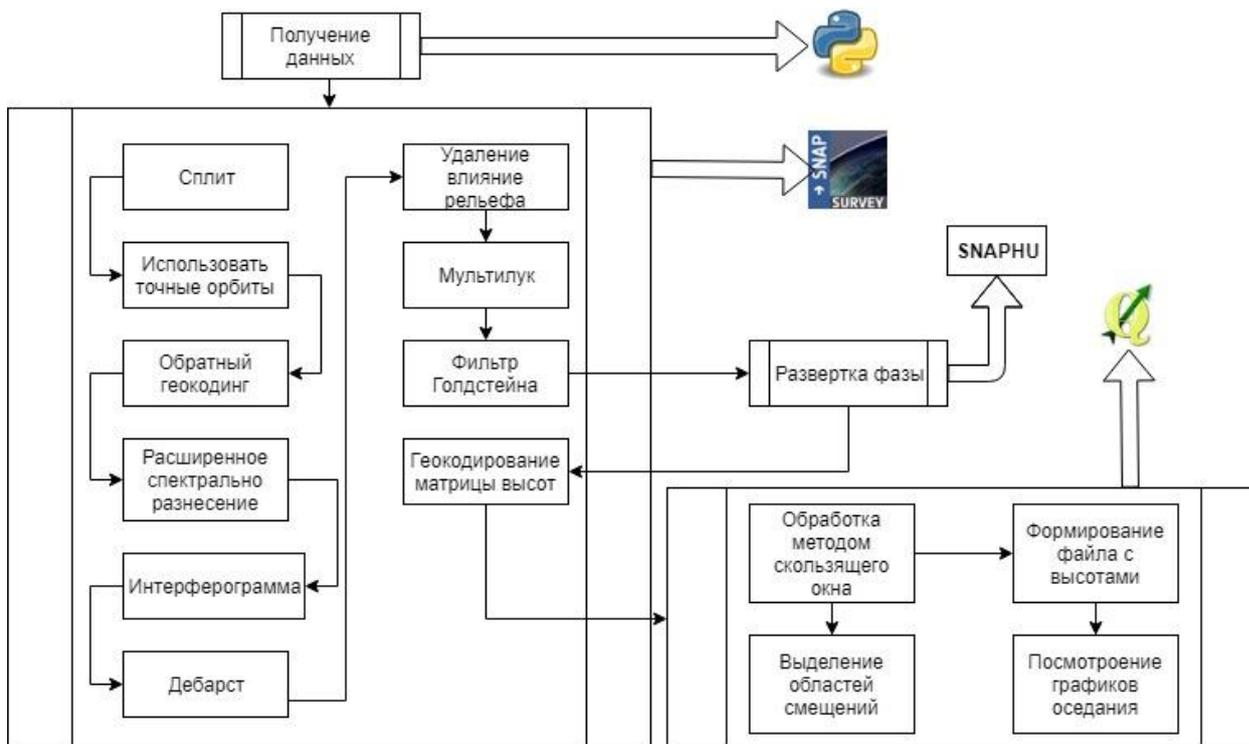


Рис. 34. Блок-схема методики мониторинга

1. Выбор данных

Для того, чтобы успешно сформировать интерферограмму, данные должны соответствовать условиям:

Для интерферометрической обработки используются данные уровня SLC.

Пространственная базовая линия не должна быть выше определенного критического значения, для Sentinel-1 IW — около 200 м. Как правило, этому требованию удовлетворяют данные, относящиеся к одной орбите. У каждого из спутников Sentinel-1 получается 175 таких орбит за 12-дневный цикл облета планеты.

Снимки должны относиться к одному виду движения спутника: восходящему или нисходящему.

Все перечисленные параметры вводятся на официальном сайте, на котором в открытом доступе находятся данные Sentinel (Copernicus Open Access Hub) (рис. 35).

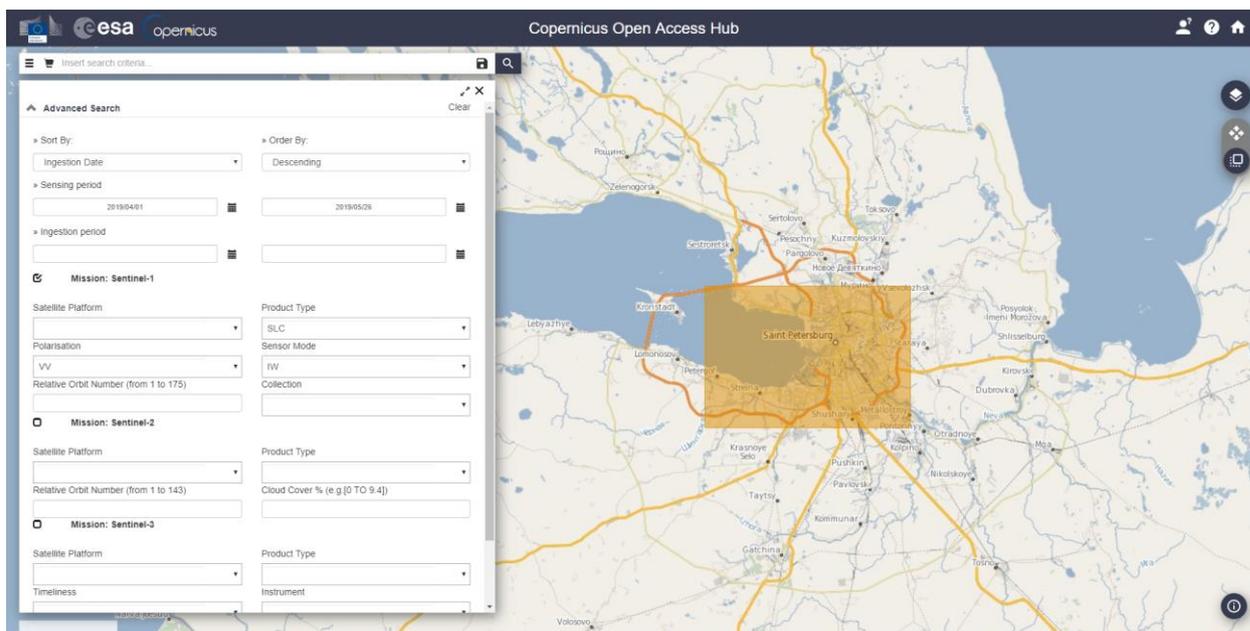


Рис. 35. Окно выбора данных на Copernicus Open Access Hub

Важно отметить, что одновременно с официального сайта можно скачивать не более двух снимков, это процесс по времени зависит от скорости интернета, но в любом случае он довольно продолжительный. Потому рекомендуется использовать для этого скрипт, написанный на языке Python (Библиотека «SentinelSat»).

Для его запуска в командной строке необходимо будет ввести все те же параметры, что и на официальном сайте: логин, пароль, даты и т.д. Также понадобится полигон для поиска в одном из векторных форматов (SHP, KML, GeoJSON).

2. Обработка

Обработка данных Sentinel выполняется в SNAP, одним из минусов данного программного обеспечения является работа с обновлениями плагинов. К сожалению, программа при запуске не сообщает о том, что следует скачать новые версии модулей и поэтому рекомендуется это проверять самостоятельно.

На этапе коррегистрации следует обращать внимание, что скачивать обновленный файл с точными орбитами не всегда предоставляется возможным скачать и можно использовать устаревший.

При построении дифференциальной интерферограммы используется консоль Linux для работы со SNAPHU. Для Windows понадобится использовать виртуальную машину или Cygwin.

Развертывание требует много памяти и времени.

В случае появления ошибки *Unexpected or abnormal exit of child process* следует во время экспорта в SNAPHU увеличить значения `row` и `column` с 10 (по умолчанию) до 20. Желательное решение проблемы: увеличить объем ОЗУ.

Импорт из SNAPHU:

1. Загрузить снимок, полученный непосредственно перед экспортом в SNAPHU (после фильтра Голдстейна).
2. Прочитать новый файл для этого надо выбрать `hdr`-файл развернутой фазы, подготовленный SNAPHU.

Ошибка импорта: *couldn't read the hdr file*.

Причина неизвестна. Возникает, если на шаге S1 TOPS Coregistration выбрать обе поляризации: VH и VV. Решается удалением из продукта с VH поляризацией перед экспортом в SNAPHU.

Нужно проверить соответствие имени `img`-файла тому, что записано внутри `hdr`-файла и привести в соответствие. HDR и IMG должны иметь одинаковые имена.

Последний этап «Формирование карты смещений» оперативный – преобразование в географическую систему координат. Необходимо задать размер ячейки, рекомендуется использовать 100.

3. Визуализация

Визуализацию можно делать в любом программном обеспечении, которое поддерживает растровый данные в формате GeoTiff.

Полученные данные рекомендуется перевести в векторный формат, сначала в полигональный, затем построить для каждого полигона центроиды и это уже карта-схема, отражающая зоны оседаний земной поверхности.

В рамках картографической визуализации возможно создание серии карт оседаний или очагов аномальных и постоянных опусканий. Средствами гис-анализа реализуется построение графиков на их основе, выбор шага шкалы смещений в легенде и др.

4.2.2 Системные требования

1. Операционная система

Как уже отмечалось выше, развертка фазы происходит в SNAPHU, который доступен только для Linux.

Можно установить виртуальную машину с Linux, однако тут возникнут ограничения по оперативной памяти и процесс обработки займет много времени.

2. Оперативная память

Решающим моментом в мониторинге является оперативность получения необходимой информации, поэтому были проведены тесты на время обработки данных на трех

разных компьютерах с разной оперативной памятью. Результаты представлены в сводной табл. 6.

Таблица 6

Результаты временных затрат в зависимости от ОЗУ

ОЗУ	Время обработки
6 ГБ	12 часов
16 ГБ	7 часов
64 ГБ	2 часа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оседания земной поверхности в урбанизированных районах — проблема, по праву занимающая важное место в современном мире, которая неизбежно нуждается в оперативном и постоянном наблюдении для предотвращения возможных последствий. В выпускной квалификационной работе предлагается методика мониторинга на основе метода радиолокационной спутниковой интерферометрии по открытым данным радарного спутника Sentinel 1.

В результате выполненной работы было реализовано следующее:

- 1) Определены причины возникновения оседаний земной поверхности. Природа их возникновения бывает как геологическая, так и антропогенная. Эти явления широко изучены учеными из разных областей географии, геоморфологии, геологии и даже экологии.
- 2) Рассмотрены методы мониторинга опусканий земной поверхности. Большинство изученных типов оседаний подвергаются наземным геодезическими и аэрогеодезическими измерениям. Однако масштабирование работ на урбанизированные территории будет довольно ресурсозатратным.
- 3) Изучена общая теория радиолокационной спутниковой интерферометрии, методами которой можно получать информацию на обширные территории, чем и оправдано решение разрабатывать методику, основанную на свободно распространяемых данных радарного спутника Sentinel 1.
- 4) Среди существующих методов радиолокационной спутниковой интерферометрии для определения оседаний земной поверхности в урбанизированных районах и был выбран метод мультитременной DInSAR и апробирован на территориях городов Санкт-Петербург, Череповец и Мехико.
- 5) Вся методика реализована на открытом программном обеспечении для обработки радиолокационных данных – SNAP и для геоинформационного анализа и картографической визуализации – QGIS. Все этапы обработки данных были автоматизированы и реализованы в Graph Builder и составлены рекомендации по каждому из этапов. Для картографической визуализации и отображения статистики были приведены примеры с выделенной группой инструментов для этого.
- 6) Сформированные методические указания помимо этапов обработки содержат технические рекомендации, основанные на проведенных тестах. Обработка радиолокационных данных крайне требовательный к ОЗУ процесс, поэтому были выбраны три варианта: 6, 12, 64 Гб. Проведенный анализ, позволил оценить временные затраты на обработку

одной пары и сформировать технические критерии к вычислительным машинам для оперативных определений оседаний.

Реализация разработанной методики проведена на данных по г. Санкт-Петербургу за период с июня 2018 по май 2019 года и показала, что критических смещений не наблюдается. Также получилось установить медленную просадку грунта во Фрунзенском районе, которая впоследствии привела к прорыву подземных коммуникаций и попаданию пассажирского транспорта в горячую воду.

Предложенная методика мониторинга потенциально экономит время пользователей на получение информацией об оседаниях земной поверхности в урбанизированных районах и позволит определять тенденции в просадках грунта и устранять причины до возникновения опасных последствий. Данную методику возможно совершенствовать за счет использования более точных ЦМР и контрольными геодезическими измерениями, однако, это уже другой уровень мониторинга, предполагающий задействование денежных средств и использование данных, находящихся под государственной тайной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Апачиди К. Н., Верещагин О. Р. Анализ процессов оседания земной поверхности в районе горных выработок на основе радиолокационных спутниковых данных //Проблемы геологии и освоения недр: труды XIX Международного симпозиума имени академика МА Усова студентов и молодых ученых, посвященного 70-летию юбилею Победы советского народа над фашистской Германией, Томск, 6-10 апреля 2015 г. Т. 1.—Томск, 2015. – 2015. – Т. 1. – С. 467-469.
2. Баранов Ю. Б. и др. Мониторинг смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях углеводородов с помощью комплекса космических и геодезических методов //Недропользование XXI век. – 2009. – №. 1. – С. 60-64.
3. Балдина Е. А., Трошко К. А., Николаев Н. Р. Радиолокационные данные Sentinel-1 и возможности их обработки для дешифрирования форм рельефа острова котельный // Известия высших учебных заведений. 2016. №. 3. С. 78-85.
4. Баринов А. В. и др. Опасные природные процессы //М.: Изд-во Академия ГПС МЧС России. – 2009.
5. Верба В. С. и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – 2010.
6. Гусев В. Н. и др. Основы наземной лазерно-сканирующей съемки: Учеб. пособие //СПб.: Санкт-Петерб. гос. горн. ин. – 2007. – Т. 2007. – С. 86.
7. Деревенская О.Ю., Эколого-экономические аспекты развития городов: конспект лекций, КФУ, Казань, 2014. – С. 134.
8. Джувеликян Х. А., Щеглов Д. И., Горбунова Н. С. Загрязнение почв тяжелыми металлами. Способы контроля и нормирования загрязненных почв //Воронеж: Изд-во ВГУ. – 2009.
9. Дмитриев П.Н., Новые методы обработки и интерпретации данных радарной спутниковой интерферометрии: дис. к. ф.-м.н. ИФЗ РАН, Москва, 2013. — С. 124.
10. Доросинский Л. Г. Оптимальная обработка радиолокационных изображений, формируемых в РСА. – 2017.
11. Зинченко О. Н. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофото-съемки для картографирования //М.: Ракурс, Россия [http://www. racurs.ru](http://www.racurs.ru). – 2011.
12. Калашник Ж. В. Влияние изменения уровня грунтовых вод на инженерно-геологическую обстановку Нижнего Поволжья //Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2006. – №. 6.

13. Кантемиров Ю. И. Обзор современных радиолокационных данных ДЗЗ и методик их обработки с использованием программного комплекса SARSCAPE //GEOMATICS. – 2010. – №. 3. – С. 44.
14. Коберниченко В. Г., Сосновский А. В. Особенности построения цифровых моделей рельефа на основе метода космической радиолокационной интерферометрии //Труды СПИИРАН. – 2013. – Т. 28. – №. 0. – С. 194-208.
15. Коган Р. М., Калманова В. Б. Кислотность почв как показатель экологического состояния городской территории (на примере г. Биробиджана) //Региональные проблемы. – 2008. – №. 10.
16. Кольцов П. В. Методика без отражательных наблюдений за деформирующимися участками бортов карьеров и отвалов //Записки Горного института. – 2012. – Т. 198.
17. Копенков В.Н., Баврина А.Ю. Обработка радиолокационных данных // Метод. указания к лаб. работе. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 40 с.
18. Ксендзук, А. В. Решение задачи развёртки фазы и устранения неоднозначности определения высоты в двухчастотном интерферометре с синтезированной апертурой / А. В. Кендзук // Журнал радиоэлектроники. – 2002. – № 9.
19. Курчин Г. С. и др. Проблемы экологии при добыче нерудных строительных материалов в России //Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №. 6. – С. 1-1.
20. Леухин А. Н., Безродный В. И., Воронин А. А. Дистанционное зондирование Земли с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны //Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2018. – Т. 160. – №.1.
21. Максимович Г. А. Химическая география вод суши. – ГЕОГРАФГИЗ 1955, 1955.
22. Максимович Г. А. Основы карстоведения: Том I. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. – Пермское книжное издательство, 1963. – Т. 1.
23. Маруашвили Л. И. Морфологический анализ карстовых пещер //Очерки по физической географии Грузии. Тбилиси. – 1969. – С. 5-84.
24. Неровных А.Н., Заворотный А.Г., Бутенко В.М., Опасные природные процессы: учеб. Пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 306 с.
25. Огородова Л. В., Шилкин П. А. Определение геодезических координат из пространственной линейной засечки //М.: МИИГАиК. – 2015.
26. Орынбасарова Э.О., Соутер Э. Особенности обработки и применения радарных снимков Sentinel-1 при деформационном мониторинге земной поверхности на примере нефтяного месторождения западного Казахстана //Интерэскпо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр., Пленарное заседание: сб. материалов. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – С. 83-90.

27. Пономаренко М.Р., Разработка метода деформационного мониторинга открытых горных работ в условиях крайнего севера с использованием космического радиолокационного зондирования: дис. к.т.н. Горный университет, Санкт-Петербург, 2018— С. 155.
28. Разумов Г. А., Хасин М. Ф. Тонушие города. – Стройиздат, 1991.
29. Родионова Н. В., Синило В. П. Способы подавления спекл-шума в радиолокационном изображении // Автометрия. 1993. №. 5. С. 96.
30. Середович В. А. и др. Наземное лазерное сканирование. – 2009.
31. Синцов А. В., Бармин А. Н. Современная классификация почвенного покрова городских территорий //Геология, география и глобальная энергия. – 2011. – №. 3. – С. 149-155.
32. Смирнов А.В., Обзор беспилотных летательных аппаратов для картографирования// Материалы VI Международной научно-практической конференции «Геодезия, маркшейдерия, аэросъемка на рубеже веков», Москва, 2015.
33. Трошко К.А., Разработка методики использования радиолокационных данных для тематического картографирования: дис. к.г.н. МГУ, Москва, 2018— С. 158.
34. Хаметов Т. И. Инженерная геодезия. Учебное пособие по направлению подготовки 08.05. 01 «Строительство уникальных зданий и сооружений». – 2016.
35. Шарапов Р. В. и др. Исследование карстового провала в с. Чудь Нижегородской области //Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2014. – №. 4. – С. 22.
36. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 118 с.
37. Bateson L. et al. The application of the Intermittent SBAS (ISBAS) InSAR method to the South Wales Coalfield, UK //International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2015. – Т. 34. – С. 249-257.
38. Casagli N. et al. Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry //Landslides. – 2010. – Т. 7. – №. 3. – С. 291-301.
39. Cascini L. et al. Subsidence monitoring in Sarno urban area via multi-temporal DInSAR technique //International Journal of Remote Sensing. – 2006. – Т. 27. – №. 8. – С. 1709-1716.
40. Chen C. W., Zebker A. H. SNAPHU: statisticalcost, network-flow algorithm for phase unwrapping //Retrieved April. – 2003. – Т. 27. – С. 2016.
41. Fang J. et al. Compressed sensing SAR imaging with multilook processing //arXiv preprint arXiv:1310.7217. – 2013.
42. Ferretti, A. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry / A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. – 2000. – Vol. 38. – No. 5. – P. 2202–2212.

43. Ferretti A. et al. Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2007. – T. 45. – №. 5. – C. 1142-1153.
44. Fernandez P. et al. First delimitation of areas affected by ground deformations in the Guadalfeo River Valley and Granada metropolitan area (Spain) using the DInSAR technique //Engineering Geology. – 2009. – T. 105. – №. 1-2. – C. 84-101.
45. Gernhardt S. et al. Potential of very high-resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas //Annals of GIS. – 2010. – T. 16. – №. 2. – C. 103-111.
46. Ghiglia, D. G. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods / D. G. Ghiglia, L. A. Romero // J. opt. soc. amer. A.. – 1994. – Vol. 11. – No. 1. – P. 107–117.
47. Goel K., Adam N. An advanced algorithm for deformation estimation in non-urban areas //ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. – 2012. – T. 73. – C. 100-110.
48. Herrera G. et al. Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain) //Engineering Geology. – 2007. – T. 90. – №. 3-4. – C. 148-159.
49. Hellwich, O. SAR interferometry: Principles, processing, and perspectives / Olaf Hallwich // Technische Universität München. – 1999. – P. 109–120
50. Holzer T. L. et al. Mitigating losses from land subsidence in the United States. – National Academies, 1991.
51. Hooper, A. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers / A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, B. Kampes // Geophysical research letters. – 2004. – Vol. 31. – L. 23611. – P. 1–5.
52. Hooper A. et al. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers //Geophysical research letters. – 2004. – T. 31. – №.23.
53. Huang J. et al. A Homogenous Pixel-Weighted Interferometric Phase Filtering Method for Time-series InSAR //Beijing Da Xue Xue Bao. – 2018. – T. 54. – №. 6. – C. 1242-1250.
54. Lanari R. et al. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2004. – T. 42. – №. 7. – C. 1377-1386.
55. Moreira A. et al. A tutorial on synthetic aperture radar //IEEE Geoscience and remote sensing magazine. – 2013. – T. 1. – №. 1. – C. 6-43.
56. Peduto D. et al. A general framework and related procedures for multiscale analyses of DInSAR data in subsiding urban areas //ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. – 2015. – T. 105. – C. 186-210.

57. Samsonov S. V. et al. Rapidly accelerating subsidence in the Greater Vancouver region from two decades of ERS-ENVISAT-RADARSAT-2 DInSAR measurements //Remote Sensing of Environment. – 2014. – Т. 143. – С. 180-191.
58. European Space Agency. Sentinel-1 User Handbook. – 2013.
59. Valero, J. L. A survey of phase unwrapping techniques, with applications to SAR / J. L. Valero, I. Cumming // Technical report. – 1995.
60. Werner C. et al. Interferometric point target analysis for deformation mapping //IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477). – IEEE, 2003. – Т. 7. – С. 4362-4364.
61. Yerro A. et al. Analysis of the evolution of ground movements in a low densely urban area by means of DInSAR technique //Engineering Geology. – 2014. – Т. 170. – С. 52-65.
62. Yagüe-Martínez N. et al. Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2016. – Т. 54. – №. 4. – С. 2220-2234.
63. Zeitoun D. G., Wakshal E. Land subsidence analysis in urban areas: the Bangkok metropolitan area case study. – Springer Science & Business Media, 2013.
64. Zhang Y. et al. Monitoring of urban subsidence with SAR interferometric point target analysis: a case study in Suzhou, China //International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2011. – Т. 13. – №. 5. – С. 812-818

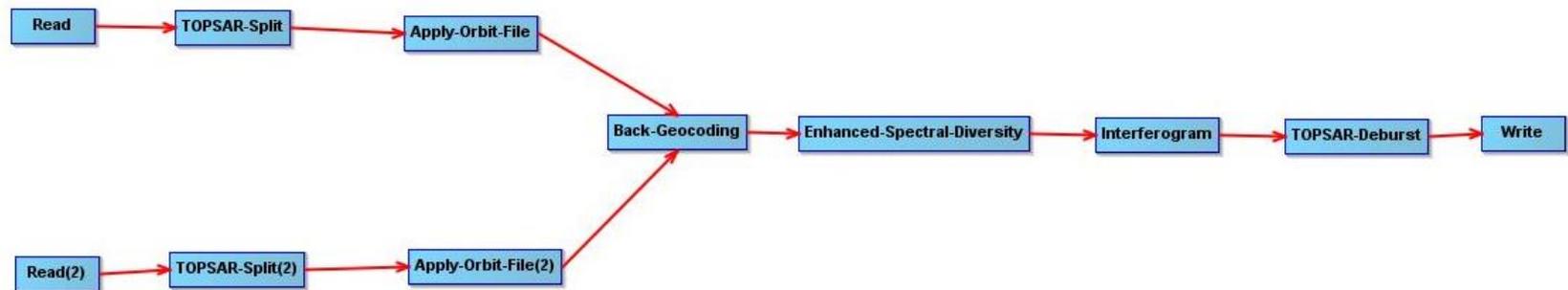
Интернет источники

65. <https://ru.sott.net/article/2700-provaly-pochvy> — Провалы почвы: почему проваливаются города
66. <http://www.racurs.ru/wiki> — Вики-фотограмметрия
67. <http://www.racurs.ru/?page=65> — PHOTOMOD Radar – пакет обработки данных с космических РСА
68. <https://www.geoscan.aero/ru> — К Геоскан Беспилотные технологии
69. <http://dkhramov.dp.ua/> — Руководства по обработке радиолокационных данных Sentinel 1
70. <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1828> — GEOG 862 — GPS and GNSS for Geospatial Professionals
71. <https://www.dlr.de> – DLR — German Remote Sensing Data Center
72. <https://www.gis-blog.com/download-sentinel-2-data-using-python-or-command-line/> – GIS-Blog — Download Sentinel data using Python or Command Line
73. <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm> — Advanced Land Observing Satellite. ALOS Research and Application Project of EORC, JAXA

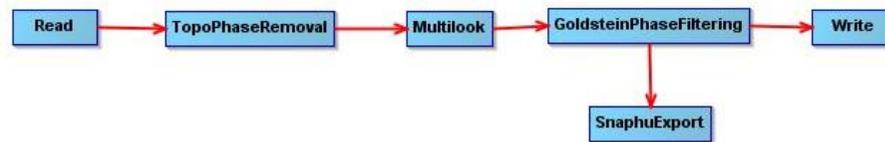
74. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home> — Sentinel Missions
75. <http://www.copernicus.eu/> — Copernicus Programme
76. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> — Copernicus Open Access Hub
77. <http://step.esa.int/main/download/> — Sentinel Toolboxes
78. http://nova.stanford.edu/sar_group/snaphu/ — Snaphu
79. <https://qgis.org/ru/site/> — QGIS
80. <https://pypi.org/project/sentinelsat/> — Библиотека «SentinelSat»

ПРИЛОЖЕНИЕ №1

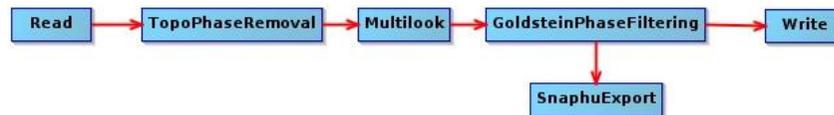
Модель №1



Модель №2



Модель №3



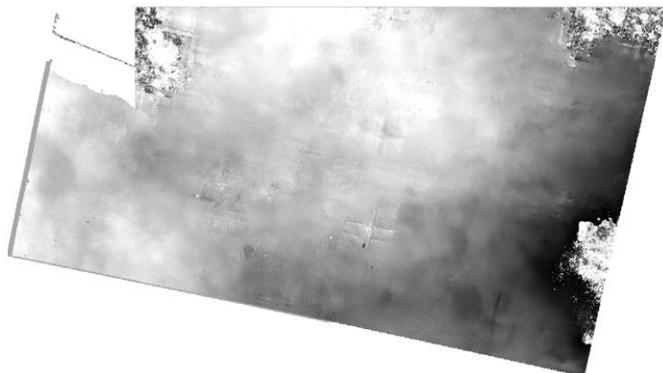
ПРИЛОЖЕНИЕ №2

№	Название	Дата
1	S1A_IW_SLC__1SDV_20180611T042527_20180611T042557_022304_0269FF_2A95	2018_06_11
2	S1B_IW_SLC__1SDV_20180617T042445_20180617T042515_011408_014F3F_FBFF	2018_06_17
3	S1A_IW_SLC__1SDV_20180623T042528_20180623T042557_022479_026F41_3954	2018_06_23
4	S1B_IW_SLC__1SDV_20180629T042446_20180629T042516_011583_0154B1_1196	2018_06_29
5	S1A_IW_SLC__1SDV_20180705T042528_20180705T042558_022654_02745E_922C	2018_07_05
6	S1B_IW_SLC__1SDV_20180711T042447_20180711T042516_011758_015A1D_2D54	2018_07_11
7	S1A_IW_SLC__1SDV_20180717T042529_20180717T042559_022829_0279AA_1611	2018_07_17
8	S1B_IW_SLC__1SDV_20180723T042448_20180723T042518_011933_015F72_498C	2018_07_23
9	S1A_IW_SLC__1SDV_20180729T042530_20180729T042600_023004_027F32_0A5B	2018_07_29
10	S1B_IW_SLC__1SDV_20180804T042448_20180804T042518_012108_0164B8_5C92	2018_08_04
11	S1A_IW_SLC__1SDV_20180810T042530_20180810T042600_023179_0284AA_6301	2018_08_10
12	S1B_IW_SLC__1SDV_20180816T042449_20180816T042519_012283_016A21_F540	2018_08_16
13	S1A_IW_SLC__1SDV_20180822T042531_20180822T042601_023354_028A53_E3CE	2018_08_22
14	S1B_IW_SLC__1SDV_20180828T042449_20180828T042519_012458_016F93_A4DD	2018_08_28
15	S1B_IW_SLC__1SDV_20180909T042450_20180909T042520_012633_0174F9_0BAD	2018_09_09
16	S1A_IW_SLC__1SDV_20180915T042532_20180915T042602_023704_02957D_ABDB	2018_09_15

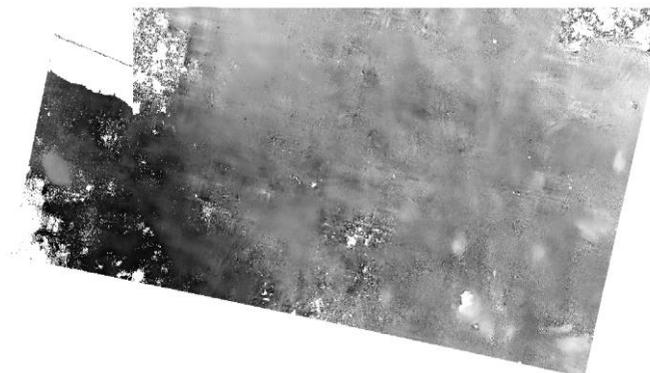
17	S1B_IW_SLC__1SDV_20180921T042450_20180921T042520_012808_017A52_A232	2018_09_21
18	S1A_IW_SLC__1SDV_20180927T042532_20180927T042602_023879_029B28_265E	2018_09_27
19	S1B_IW_SLC__1SDV_20181003T042451_20181003T042521_012983_017FAF_1E18	2018_10_03
20	S1A_IW_SLC__1SDV_20181009T042533_20181009T042603_024054_02A0ED_279D	2018_10_09
21	S1B_IW_SLC__1SDV_20181015T042451_20181015T042521_013158_018504_6E25	2018_10_15
22	S1A_IW_SLC__1SDV_20181021T042533_20181021T042603_024229_02A69F_98F7	2018_10_21
23	S1B_IW_SLC__1SDV_20181027T042451_20181027T042521_013333_018A71_3133	2018_10_27
24	S1A_IW_SLC__1SDV_20181102T042533_20181102T042603_024404_02AC61_6022	2018_11_02
25	S1B_IW_SLC__1SDV_20181108T042451_20181108T042521_013508_018FEC_811A	2018_11_08
26	S1A_IW_SLC__1SDV_20181114T042532_20181114T042602_024579_02B2CC_4103	2018_11_14
27	S1A_IW_SLC__1SDV_20181126T042532_20181126T042602_024754_02B93B_AE45	2018_11_26
28	S1A_IW_SLC__1SDV_20181208T042532_20181208T042602_024929_02BF13_4C62	2018_12_08
29	S1A_IW_SLC__1SDV_20181220T042531_20181220T042601_025104_02C568_F0A8	2018_12_20
30	S1A_IW_SLC__1SDV_20190101T042531_20190101T042601_025279_02CBBE_CE81	2019_01_01
31	S1A_IW_SLC__1SDV_20190113T042530_20190113T042600_025454_02D206_0BC6	2019_01_13
32	S1A_IW_SLC__1SDV_20190125T042530_20190125T042600_025629_02D86B_D24C	2019_01_25
33	S1A_IW_SLC__1SDV_20190206T042529_20190206T042559_025804_02DEB5_9F3A	2019_02_06
34	S1A_IW_SLC__1SDV_20190218T042529_20190218T042559_025979_02E4F2_5091	2019_02_18

35	S1A_IW_SLC__1SDV_20190302T042529_20190302T042559_026154_02EB38_67F4	2019_03_02
36	S1A_IW_SLC__1SDV_20190314T042529_20190314T042559_026329_02F19C_25E1	2019_03_14
37	S1A_IW_SLC__1SDV_20190326T042530_20190326T042600_026504_02F809_06E0	2019_03_26
38	S1A_IW_SLC__1SDV_20190407T042530_20190407T042600_026679_02FE7F_9F5A	2019_04_07
39	S1A_IW_SLC__1SDV_20190419T042530_20190419T042600_026854_0304D9_7381	2019_04_19
40	S1A_IW_SLC__1SDV_20190501T042531_20190501T042601_027029_030B36_A7FE	2019_05_01

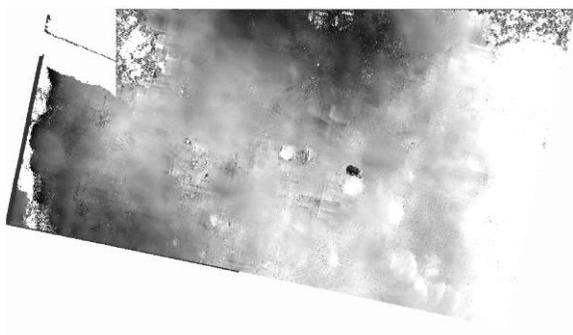
ПРИЛОЖЕНИЕ №3



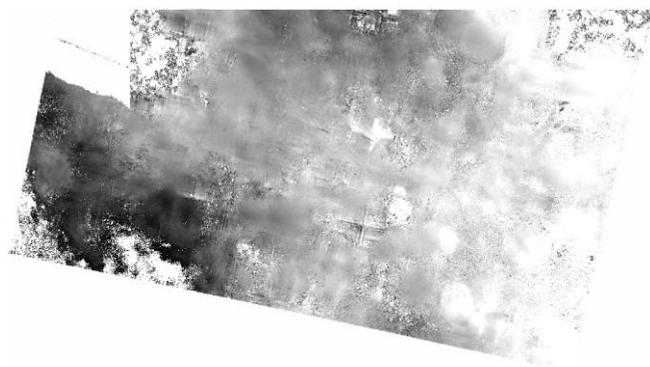
11.06.2018 - 17.06.2018



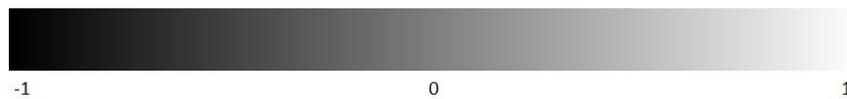
11.06.2018 - 23.06.2018

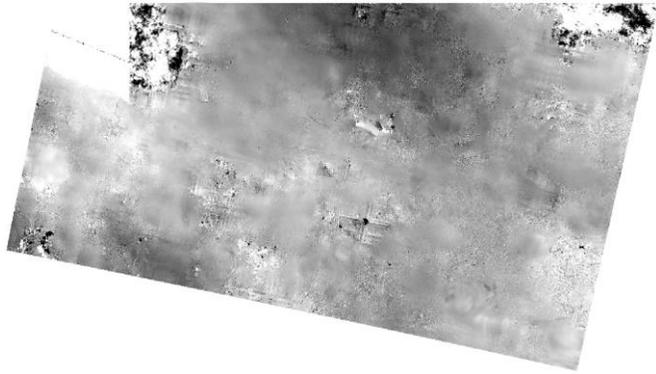


11.06.2018 - 29.06.2018

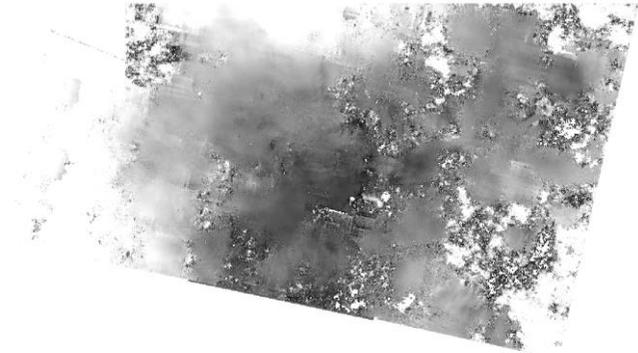


11.06.2018 - 05.07.2018

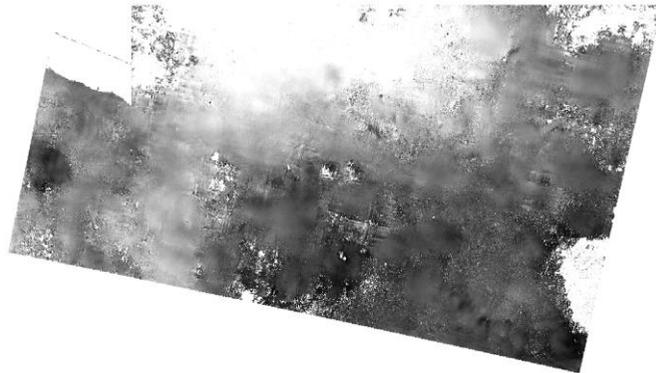




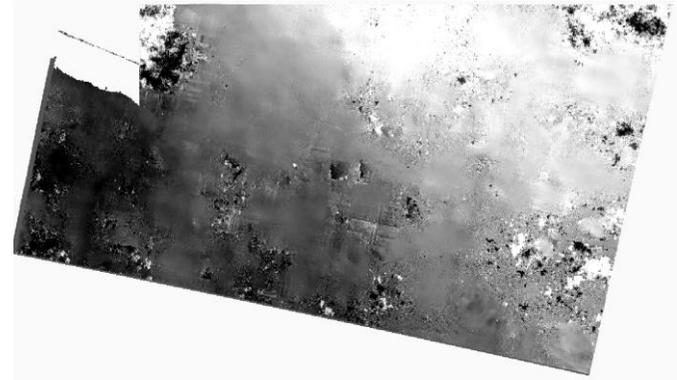
11.06.2018 - 11.07.2018



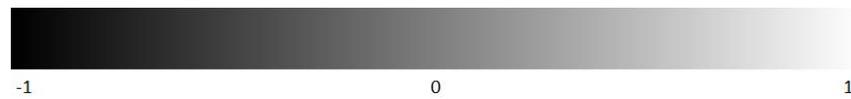
11.06.2018 - 23.07.2018

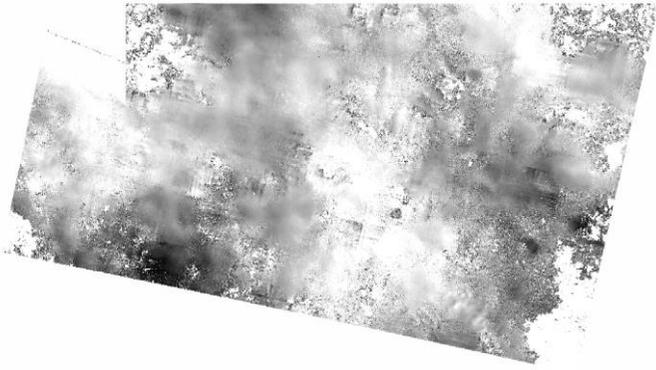


11.06.2018 - 17.07.2018



11.06.2018 - 29.07.2018

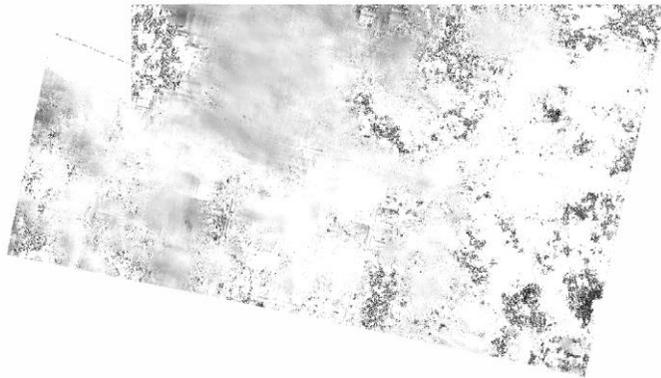




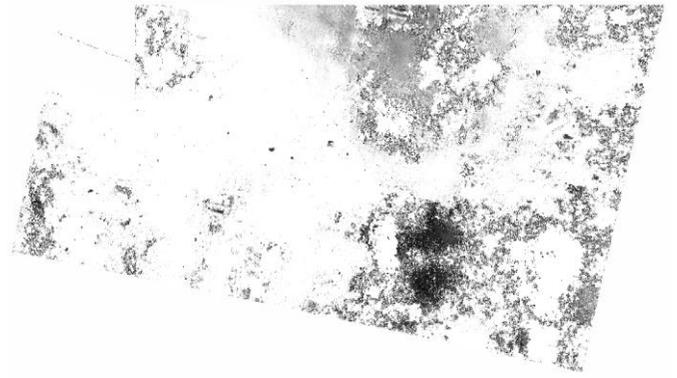
11.06.2018 - 04.08.2018



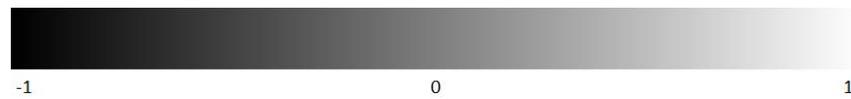
11.06.2018 - 16.08.2018



11.06.2018 - 10.08.2018



11.06.2018 - 22.08.2018





11.06.2018 - 28.08.2018



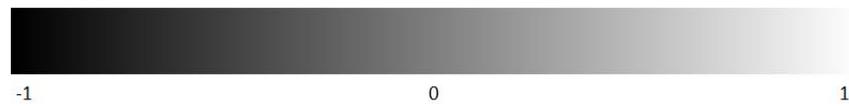
11.06.2018 - 15.09.2018

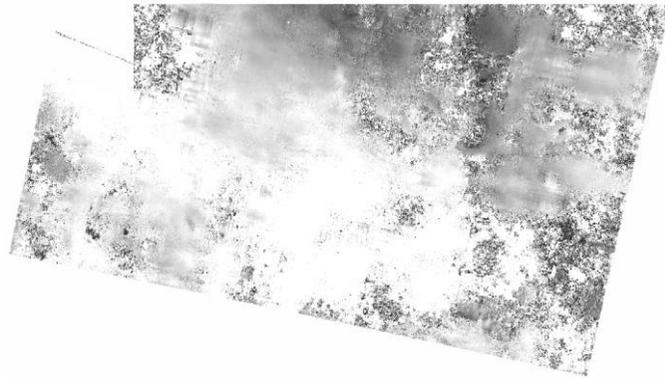


11.06.2018 - 09.09.2018

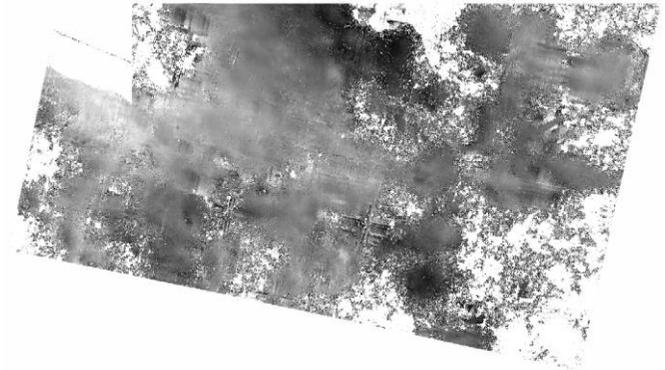


11.06.2018 - 21.09.2018

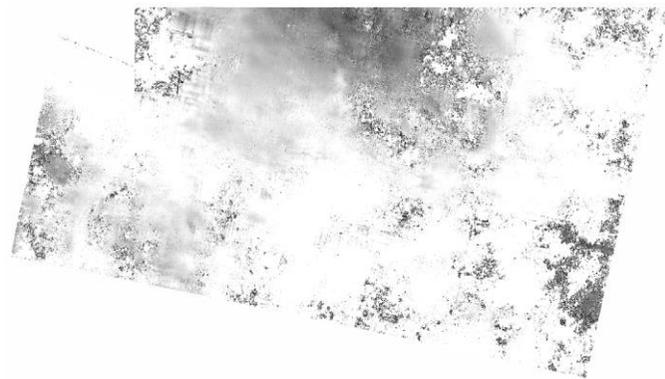




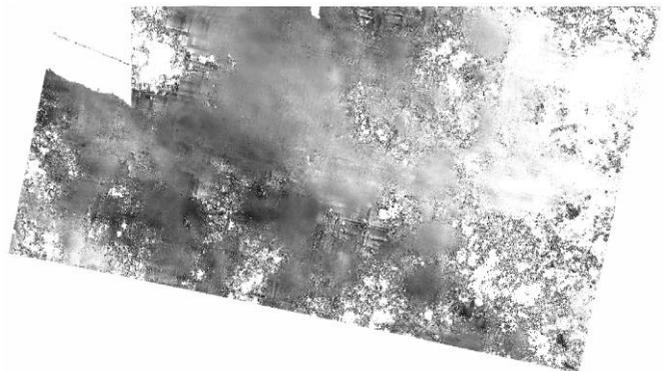
11.06.2018 - 26.09.2018



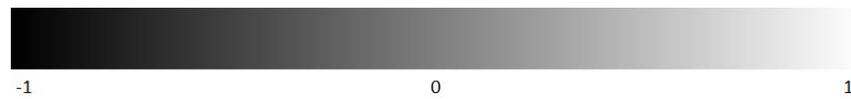
11.06.2018 - 03.10.2018

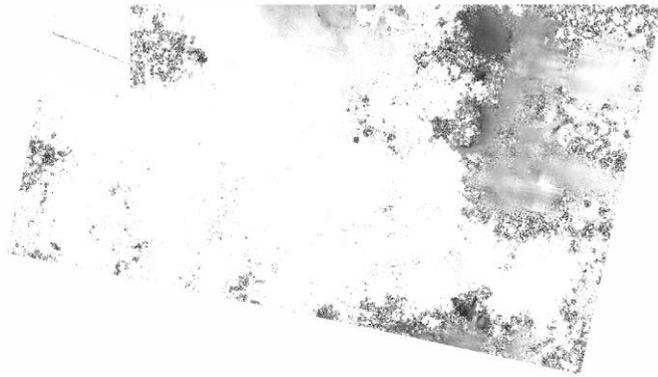


11.06.2018 - 27.09.2018



11.06.2018 - 09.10.2018





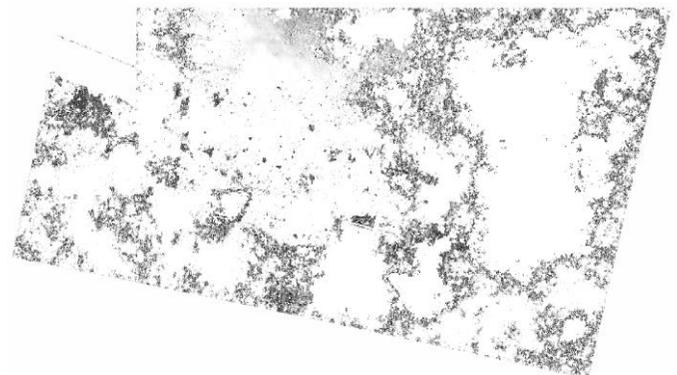
11.06.2018 - 15.10.2018



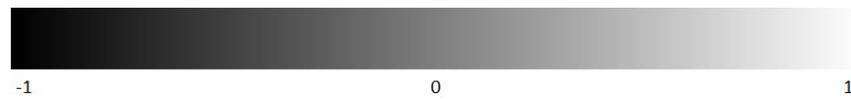
11.06.2018 - 27.10.2018

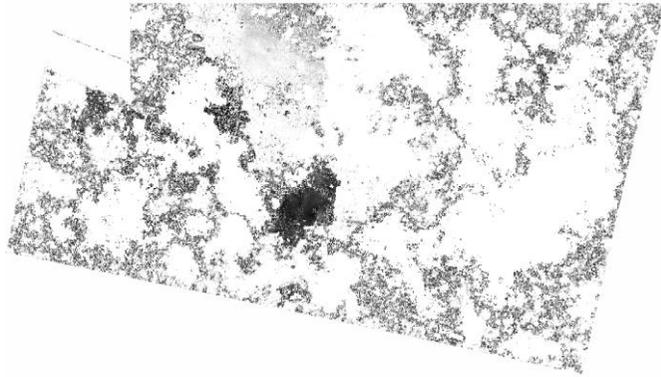


11.06.2018 - 21.10.2018

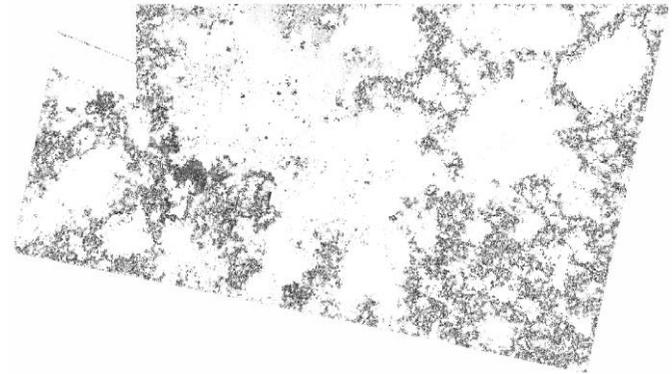


11.06.2018 - 02.11.2018

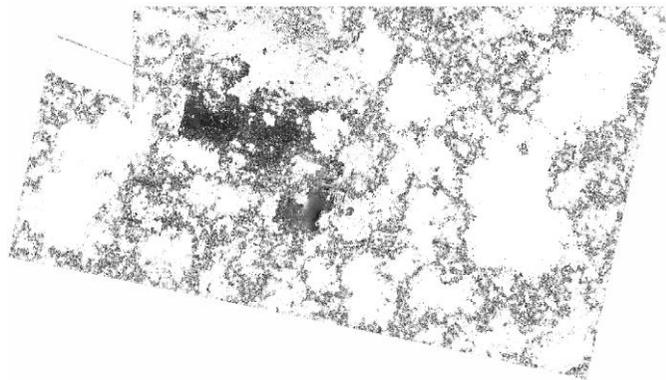




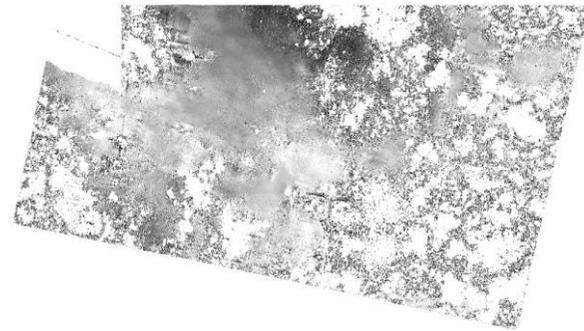
11.06.2018 - 08.11.2018



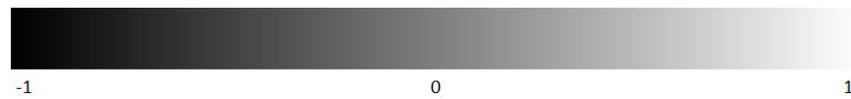
11.06.2018 - 26.11.2018

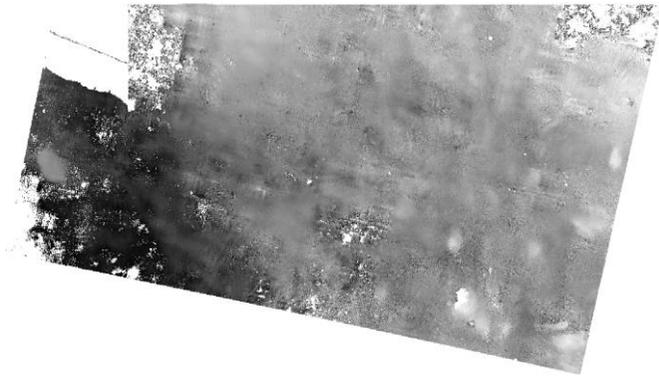


11.06.2018 - 14.11.2018

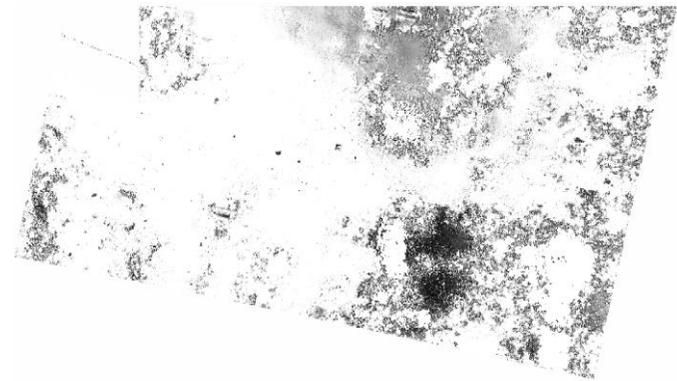


11.06.2018 - 08.12.2018

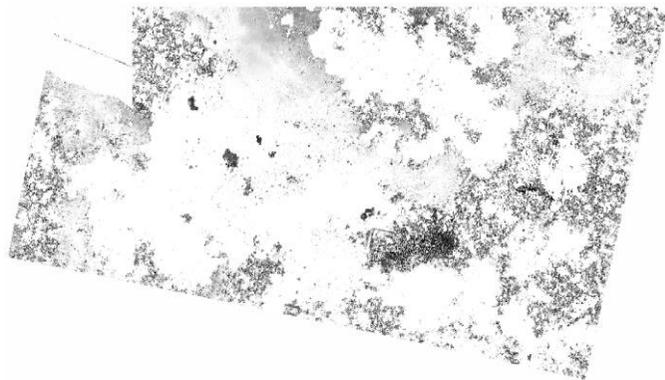




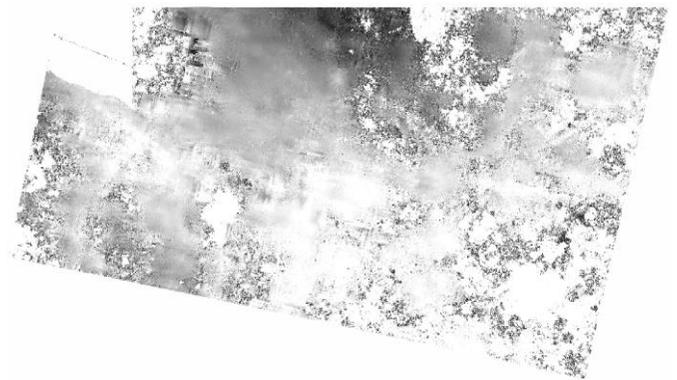
11.06.2018 - 20.12.2018



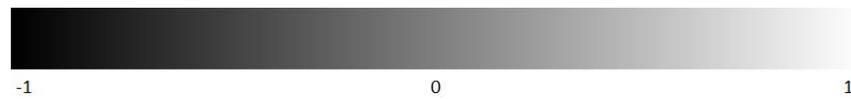
11.06.2018 - 13.01.2019

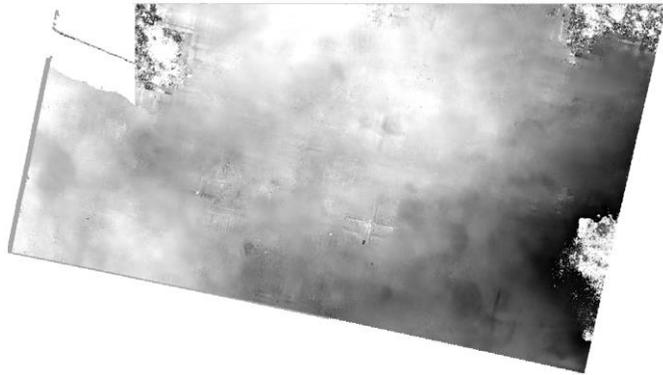


11.06.2018 - 01.01.2019

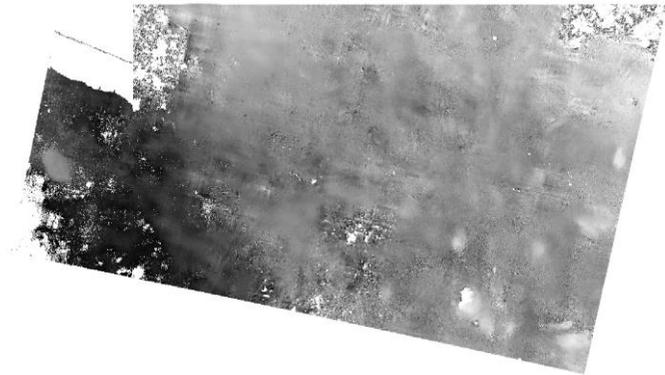


11.06.2018 - 25.01.2019

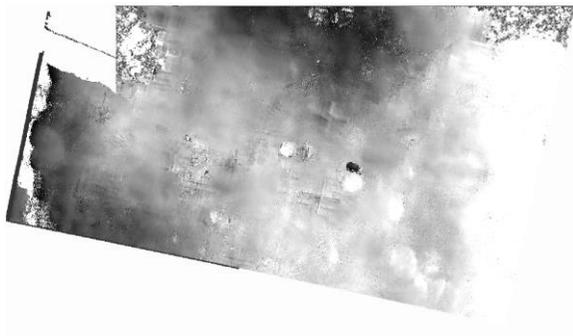




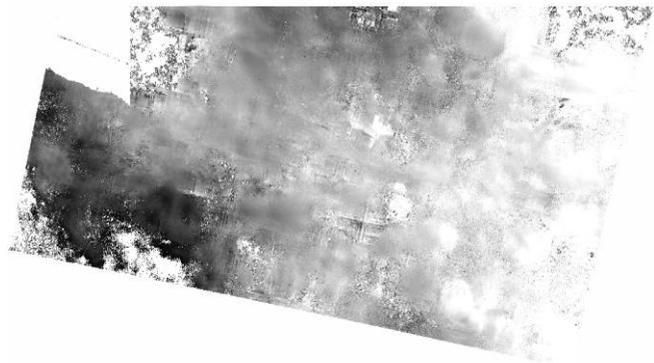
11.06.2018 - 06.02.2019



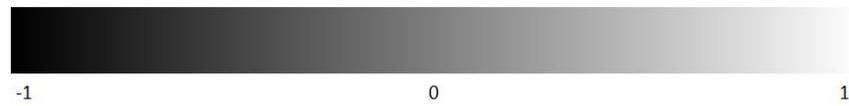
11.06.2018 - 02.03.2019

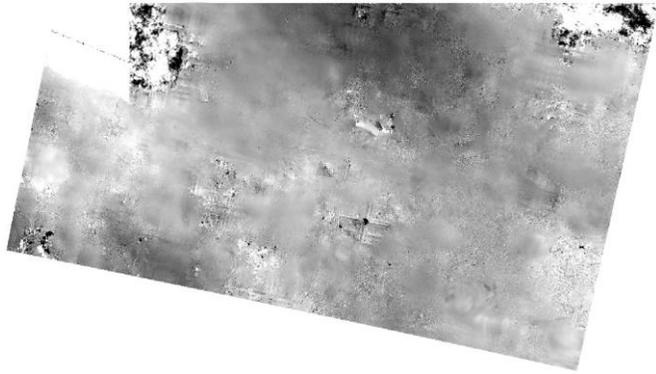


11.06.2018 - 18.02.2019

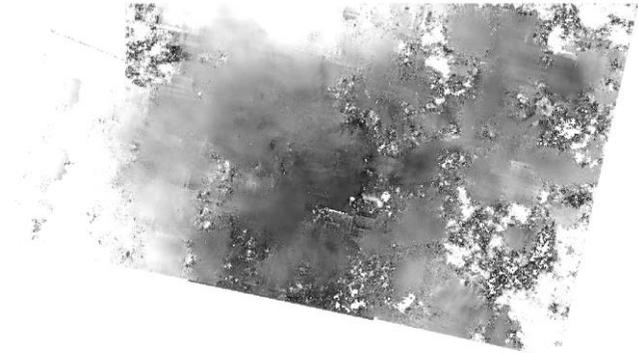


11.06.2018 - 14.03.2019

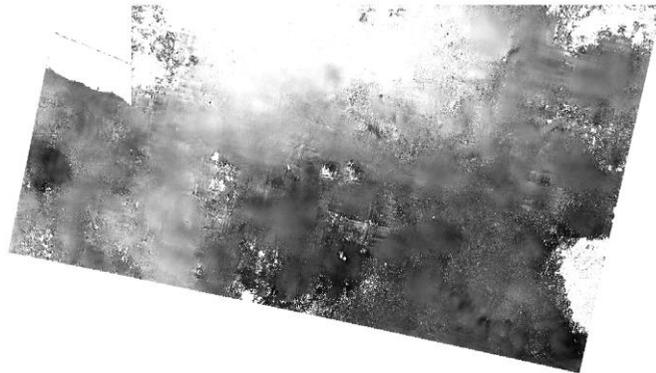




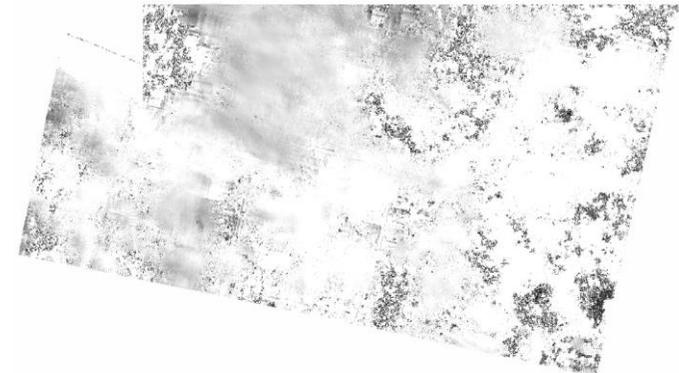
11.06.2018 - 26.03.2019



11.06.2018 - 19.04.2019



11.06.2018 - 07.04.2019



11.06.2018 - 01.05.2019

