



Қазақстан Республикасы Ұлттық ғарыштық агенттігі  
«Ұлттық ғарыштық зерттеулер және технологиялар орталығы» АҚ  
«Ионосфера институты» ЕЖШС  
«Ғарыштық зерттеулер институты» ЕЖШС  
«Ғарыштық техника және технологиялары институты» ЕЖШС

# **Жерді зерттеулердегі жербеті-ғарыштық технологиялары**

ҚР ҰҒА корреспондент-мүшесі Т.А.Мұсабаевтың  
жалпы редакциясымен

Алматы 2013



# **Наземно-космические технологии в исследованиях Земли**

Под общей редакцией члена-корреспондента НАН РК  
Т.А.Мусабаева

Алматы 2013

УДК 550.3  
ББК 22.63  
Н 19

Национальное космическое агентство Республики Казахстан  
Национальный центр космических исследований и технологий  
Институт ионосферы,  
Институт космических исследований

Серия  
«Казахстанские космические исследования»  
Том 11

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
АО «Национальный центр космических исследований и технологий»  
(протокол № 5 от 19.09 2013)

Ответственный редактор  
член-корреспондент НАН РК Ж.Ш.Жантаев

**УДК 550.3**  
**ББК 22.632**

© АО «Национальный центр космических исследований и технологий», 2013  
© ДТОО «Институт ионосферы», 2013  
© ТОО «А-ТРИ ПРИНТ», оформление, 2013

**ISBN 978-601-80431-1-6**

## Оглавление

<b>Раздел 1. Исследования геодинамики наземно-космическими методами</b>	<b>7</b>
1.1 <i>Жантаев Ж.Ш., Бибосинов А.Ж., Иванчукова А.В., Кирсанов А.В., Қурманов Б.К., Фремд А.Г.</i> ДИНАМИКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РАЙОНЕ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТЕНГИЗ ПО ДАННЫМ ДЗЗ	7
1.2 <i>Жантаев Ж.Ш., Передеро В.С., Виляев А.В., Серикбаева Э.Б.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ В РАЙОНАХ АКТИВНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ	16
1.3 <i>Жантаев Ж.Ш., Виляев А.В., Бибосинов А.Ж., Садыков К.А., Асанкулов Н.А.</i> ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕДЛЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАЗАХСТАНА ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ (GNSS)	24
1.4 <i>Жантаев Ж.Ш., Бибосинов А.Ж., Исаков Б. А., Қурманов Б.К., Фремд А.Г.</i> РАЗУПЛОТНЁННОСТЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА ПО ДАННЫМ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ	45
1.5 <i>Жантаев Ж.Ш., Ким А.С.</i> АСЕЙСМИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ В ЗЕМНОЙ КОРЕ И ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	
1.6 <i>Ким А.С., Шпади Ю.Р.</i> МЕДЛЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ БЛОКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЗОНЕ ВЯЗКОУПРУГОГО РАЗЛОМА	54
<b>Раздел 2. Исследование динамических процессов атмосферы и солнечно-земных связей на основе наземно-космических измерений</b>	<b>62</b>
2.1 <i>Крякунова О.Н., Цепакина И.Л., Николаевский Н.Ф., Малимбаев А.М.</i> ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОПАСНЫХ ПОВЫШЕНИЙ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В 2012 г.	62
2.2 <i>Антонова В.П., Крюков С.В., Луценко В.Ю.</i> ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ВАРИАЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ВЫСОКОГОРНОЙ УСТАНОВКЕ «ELIS-TS»	70

2.3 <i>Ляхов В.В., Нецадим В.М., Акасов С. Б.</i>	83
СТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОПАУЗЫ	
2.4 <i>Жумабаев Б.Т., Краснов В.М., Салихов Н.М., Дробжева Я.В., Нұргалиева Қ.Е., Сомсиков В.М.</i>	102
ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ФОНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ АТМОСФЕРЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ И В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ В ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ	
2.5 <i>Яковец А.Ф., Водяников В.В., Гордиенко Г.И.</i>	118
ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ОШИБОК МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЕМНИКА СИГНАЛОВ GPS	
<b>Раздел 3. Космические технологии в исследованиях экологии Казахстана</b>	123
3.1 <i>Абсаметов М.К., Шагарова Л.В.</i>	123
РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В КАЗАХСТАНЕ	
3.2 <i>Мухамедгалиев А.Ф., Разакова М.Г., Смирнов В.В., Бекмухамедов Б.Э.</i>	129
МОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННЫХ СМЕЩЕНИЙ ПОЧВ И ГРУНТОВ МЕТОДАМИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ	
3.3 <i>Мухамедгалиев А.Ф., Разакова М.Г., Смирнов В.В., Айдарханов Е.Е.</i>	138
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	
<b>Раздел 4. Развитие космических технологий</b>	151
4.1 <i>Исмаилов М.Б., Алпысбай И.М., Жумаканова В.Р., Нигметчанова Г.Б., Пономарева С.В., Колесников А.Б.</i>	151
РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ	
4.2 <i>Исмаилов М.Б., Алпысбай И.М., Байгонов А.Д.</i>	160
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ПОКРЫТИЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК	
4.3 <i>Архипкин О.П., Сагатдинова Г.Н.</i>	167
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОПОРТАЛА В СИСТЕМЕ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЧС В КАЗАХСТАНЕ	
4.4 <i>Ахмеджанов А.Х., Искаков А.Н., Караданов Т.К.</i>	180
АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА СОДЕРЖАНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	

4.5	<i>Муратова Н.Р., Батырбаева М.Ж., Витковская И.С., Алибаев К.У.</i>	189
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ И		
ОБВОДНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ		
СЪЕМКИ		
4.6	<i>Муратова Н.Р., Бекмухамедов Н.Э., Кауазов А.М., Малахов Д.В.,</i> <i>Исламгулова А.Ф., Дегтярева О.В.</i>	198
КАРТИРОВАНИЕ КОРМОВЫХ УГОДИЙ ЮГА КАЗАХСТАНА ПО		
СОВРЕМЕННЫМ ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ		
4.7	<i>Кауазов А.М., Муратова Н.Р., Батырбаева М.Ж., Витковская</i> <i>И.С., Тюребаева С.И.</i>	198
К ВОПРОСУ О КОСМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ФОРМИРОВАНИЯ		
СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА		
4.8	<i>Елубаев С.А., Джамалов Н.К., Алипбаев К.А., Сухенко А.С.,</i> <i>Бонеев Т.М.</i>	212
ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И		
ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КА		
4.9	<i>Бекмухамедов Б.Э., Гаврук С.В., Каипов И.В.</i>	221
ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ		
ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО		
ЗОНДИРОВАНИЯ		
4.10	<i>Молдабеков М.М., Инчин А.С., Лозбин А.Ю., Шпади Ю.Р.,</i> <i>Майлибаева Л.И., Шпади М.Ю., Инчин П.А., Аязбаев Г.М., Быкаев Р.Ж.</i>	232
НАУЧНЫЙ БЛОК КАЗАХСТАНСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ		
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ		
4.11	<i>Молдабеков М.М., Ахмедов Д.Ш., С.А. Елубаев, Н.К. Джамалов,</i> <i>К.А. Алипбаев, А.С. Сухенко, Т.М. Бонеев</i>	243
РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА СИСТЕМЫ		
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И НАВИГАЦИИ МИКРОСПУТНИКА		
4.12	<i>Молдабеков М.М., Ахмедов Д.Ш., Елубаев С.А., Джамалов Н.К.,</i> <i>Шамро А.В., Алипбаев К.А., Бонеев Т.М., Сухенко А.С.</i>	250
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ		
ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА		
4.13	<i>Ахмедов Д.Ш., Ерёмин Д.И.</i>	258
ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ МОБИЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ С		
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ		
4.14	<i>Елубаев С.А., Джамалов Н.К., Алипбаев К.А., Сухенко</i> <i>А.С., Бонеев Т.М., Шамро А.В.</i>	266
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ		
ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ		
КОСМИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ		
	<b>Список используемых сокращений</b>	275

# **Раздел 1. Исследования геодинамики наземно-космическими методами**

## **1.1 ДИНАМИКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ В РАЙОНЕ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТЕНГИЗ ПО ДАННЫМ ДЗЗ**

*Жантаев Ж.Ш.<sup>1</sup>, Бибосинов А.Ж.<sup>2</sup>, Иванчукова А.В.<sup>2</sup>, Кирсанов А.В.<sup>2</sup>,  
Курманов Б.К.<sup>2</sup>, Фрейд А.Г.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> АО «Национальный центр космических исследований и технологий»

<sup>2</sup> ДТОО «Институт ионосферы»

Освоение месторождений полезных ископаемых и, в частности, воздействие на геологическую среду с целью извлечения углеводородов занимает длительный отрезок времени и сопровождается непрерывными изменениями её напряжённо-деформированного состояния. В зависимости от особенностей геологического строения эти изменения могут проявляться в виде просадок земной поверхности и/или наведённой сейсмичности [1,2,3]. Последнее неизбежно приводит к значительному материальному ущербу. Поэтому в мировой практике разработка месторождений сопровождается непрерывными мониторинговыми наблюдениями с использованием наземных и наземно-космических методов исследования. Одним из таких методов, получивших в последнее десятилетие широкое распространение, является метод радарной интерферометрии.

В настоящей работе рассмотрены результаты дешифрирования данных радарной съёмки территории, включающей месторождение Тенгиз, которое находится в разработке с апреля 1991 года и характеризуется весьма сложными термодинамическими параметрами. Поскольку месторождение Тенгиз по своим запасам относится к числу наиболее значительных в мировой классификации, то оценка его геодинимического состояния представляет непреходящий интерес, позволяющий конкретизировать ход деформационных процессов и инициировать разработку превентивных мер, направленных на предупреждение возможных катастрофических последствий.

Таким образом, аномально высокое пластовое давление, сложное геологическое строение, а также значительный срок эксплуатации месторождения с постоянно нарастающими объемами извлекаемой нефти дают основание предполагать возможные просадки техногенного происхождения, что и послужило основанием для проведения данного исследования.

### **1.1.1 Краткая характеристика радарных данных.**

Для выявления смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз использовались данные радарной съёмки спутника Европейского космического агентства ENVISAT/ASAR и японского спутника ALOS/PALSAR, охватывающие с перекрытием период 2004-2010 г.г. Обработка велась в программном комплексе SARscape (разработчик SARMAP, Швейцария), являющимся дополнительным

модулем программы ENVI (ИТТ, США). В приведённой ниже таблице отражены характеристики радиоволновых диапазонов используемых радаров.

Диапазон	Частоты, ГГц	Длины волн, см	Спутниковые системы
C	3.9 – 6.2	3.8 – 7.6	ERS-1,2; <b>ENVISAT-ASAR</b> ; RADARSAT-1,2
L	0.39 – 1.55	19.3 – 76.9 (15 – 30)	SIR-A,B, <b>ALOS PALSAR</b>

Таблица 1.

На рисунке 1 показана схема покрытия территории месторождения Тенгиз найденными в архиве сценами ENVISAT-ASAR. Всего было использовано 33 прохода за период с 2004 по 2009 годы.



Рисунок 1. Схема покрытия месторождения Тенгиз (розовый контур) данными ENVISAT (красный контур)

На рисунке 2 показана схема покрытия территории месторождения Тенгиз сценами «ALOS PALSAR». Всего было использовано 12 проходов с 2007 по 2010 годы.



Рисунок 2. Схема покрытия месторождения Тенгиз данными ALOS PALSAR (зеленые контуры)

### **1.1.2 Основные результаты дешифрирования данных радарной съёмки, выполненной спутником ENVISAT ASAR.**

Для получения статистически выверенной оценки смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз, произошедших за период 2004-2009 г.г. было использовано 60 из 528 теоретически возможных пар снимков. При этом большая часть рассматриваемого периода анализировалась по результатам обработки не одной, а нескольких пар снимков, что значительно увеличивает достоверность получаемых результатов за счет увеличения вклада реально закономерно происходящих динамических процессов и снижения роли случайных факторов [4].

Абсолютные значения смещений по дифференциальным интерферограммам

можно оценить исходя из количества интерференционных циклов (фрингов) или их долей на этих интерферограммах (полный цикл соответствует смещениям, равным 2,75 см, т.е. половине длины волны радиолокатора ASAR).

Результирующая модель вертикальных смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз за период с 2004 по 2009 годы в цветовом кодировании представлена на рисунке 3.

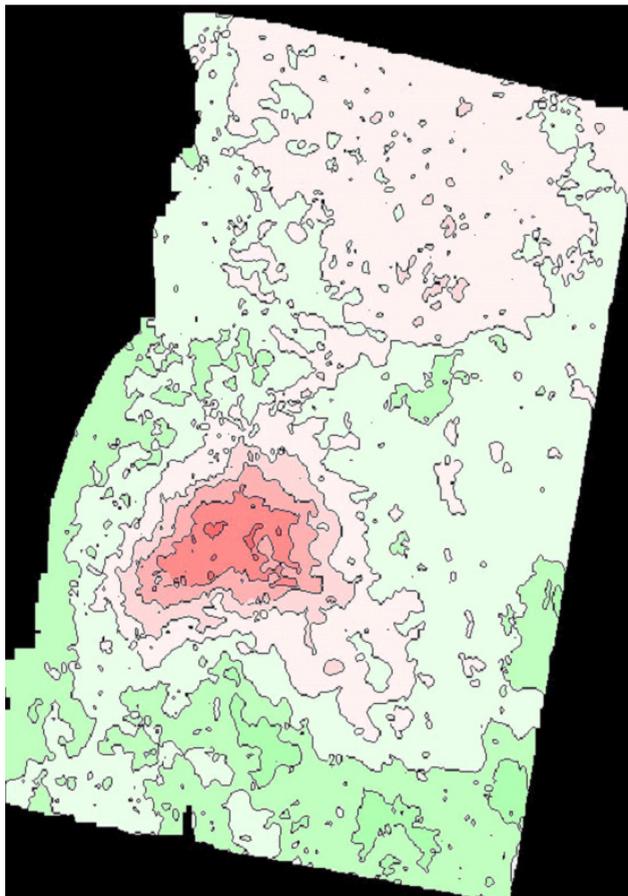


Рисунок 3. Результирующая модель вертикальных смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз за период с 2004 по 2009 годы в цветовом кодировании.

Зеленый цвет – поднятия, красный цвет – оседания. Изолинии смещений подписаны в миллиметрах («+» - поднятия, «-» - оседания)

Зарегистрированная муфта оседаний имеет приблизительно равные уклоны на северо-восточном и юго-западном склонах. При этом северо-западный ее склон более крутой, чем юго-восточный. Непосредственно береговой линии к 2009 году муфта оседаний земной поверхности не достигла.

### 1.1.3 Основные результаты дешифрирования данных радарной съёмки, выполненной спутником ALOS PALSAR.

Бортовой радиолокатор PALSAR спутника ALOS вел съёмку в L-диапазоне длин волн. Его длина волны составляла 23,5 см, что в 4 раза больше, чем длина волны радиолокатора ASAR спутника ENVISAT. Большая длина волны говорит о меньшей чувствительности данных ALOS PALSAR к малым смещениям. Но, с другой стороны, данные L-диапазона обеспечивают лучшее сохранение когерентности фаз во времени. Это позволило построить интерферограммы от первого по порядку снимка ALOS со всеми последующими. Из снимков 12-проходной цепочки можно составить всего 66 независимых пар (12 x 11 / 2). Из них по критерию наименьшей перпендикулярной пространственной базовой линии для дальнейшей обработки были отобраны 36 пар. Чтобы минимизировать временную декорелляцию пар снимков, за максимальную временную базу был принят интервал в 500 суток.

Результирующая модель смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз за период с 2007 по 2010 годы в цветовом кодировании представлена на рисунке 4.

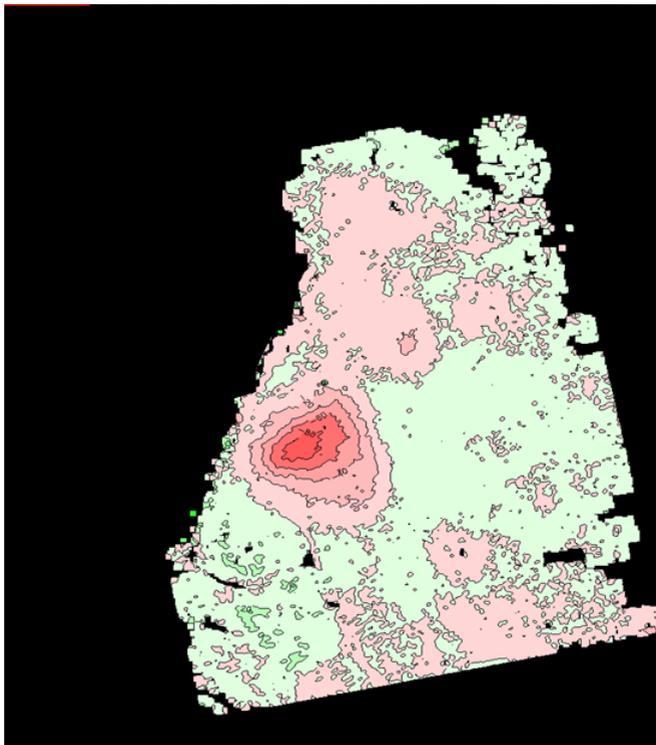


Рисунок 4. Результирующая модель вертикальных смещений земной поверхности над месторождением Тенгиз за период с 2007 по 2010 годы в цветовом кодировании.

Зеленый цвет – поднятия, красный цвет – оседания. Изолинии смещений подписаны в миллиметрах («+» - поднятия, «-» - оседания)

Основное отличие результатов мониторинга смещений в 2004-2009 гг. по данным ENVISAT от результатов мониторинга смещений за 2007-2010 годы по данным ALOS – это ярко-выраженное наличие ускорения смещений за период с 2007 по 2010 годы (за период 2004-2009 годы оседания происходили без ускорения). Наличие ускорения смещений хорошо заметно при сравнении графиков смещений за 2004-2009 и за 2007-2010 годы (рисунок 5). В частности, на графиках за 2007-2010 годы заметно ускорение смещений, начавшееся примерно в 2009 году.

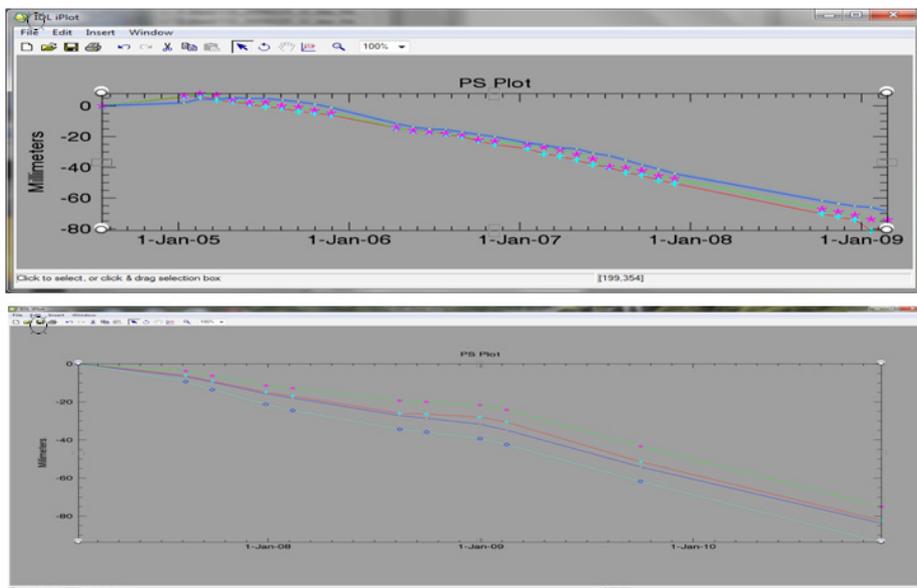


Рисунок 5. Графики оседаний в миллиметрах для нескольких типовых точек – постоянных рассеивателей радиолокационного сигнала, расположенных в самом центре зарегистрированной мульды оседаний. По оси X – даты, по оси Y – смещения в миллиметрах, знак «-» означает движение вниз (оседание). Сверху – график смещений за 2004-2009 годы по данным ENVISAT, снизу – график смещений за 2007-2010 годы по данным ALOS PALSAR

С другой стороны, при сопоставлении контуров мульды оседаний по данным ENVISAT 2004-2009 года с контурами мульды по данным ALOS хорошо заметно движение нулевой изолинии в сторону побережья, что указывает на возможную вероятность подтопления наземной инфраструктуры в будущем.

Наконец, по данным ALOS 2007-2010 года выявляется новая мульда оседаний, расположенная к северо-востоку от основной, приуроченная к месторождению Королевское (рисунок 6). Также зарегистрирована очень небольшая по площади локальная область поднятия земной поверхности на северной окраине основной мульды.

Таким образом, результаты мониторинга смещений земной поверхности, произошедших над месторождением Тенгиз в период с 2004 по 2009 годы и



### 1.1.4 Интерпретация результатов дешифрирования данных ДЗЗ.

Месторождение Тенгиз, открытое в 1979 году, занимает площадь порядка 365 квадратных километров. Мощность нефтяного пласта достигает огромной величины в 1,6 километра. Коллектор месторождения находится в интервале глубин 3,8 - 5,4 км, а пластовое давление нефти достигает 800 атм., то-есть вдвое превосходит гидростатическое давление, при котором нефть находится в большинстве месторождений. Проектом разработки месторождения Тенгиз предусматривалось [5], что длительный период добыча нефти будет происходить при постепенном снижении пластового давления до 500 атм. за счет упругой энергии нефти и грунтового скелета. В связи с этим возникли опасения, что, учитывая очень большую мощность пласта, столь значительное снижение давления нефти в пласте может привести к большим объемным деформациям залежи и, как следствие, к существенным просадкам дневной поверхности над месторождением. Различные специалисты давали оценки этим просадкам от 7 до 15 м. С учётом рельефа местности (степь) и то, что уровень суши в районе месторождения лишь незначительно выше уровня моря, такие просадки земной поверхности могли бы привести к затоплению месторождения.

Исследования вопросов деформации и разрушения грунтового скелета при упругом режиме эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, то есть при постепенном понижении пластового давления, выполненные С.А. Христиановичем [6] позволили дать оценку ожидаемых просадок земной поверхности в районе Тенгизского месторождения. Оказалось, что при понижении пластового давления до 500 атм возможные просадки кровли месторождения не превысят 1–2 м. Таким образом, вопрос о возможном затоплении месторождения в результате просадок потерял свою первоначальную остроту, хотя с повестки дня объективно снят быть не может. Диаграмма, показанная на рисунке 7, свидетельствует о непрерывном росте объёмов добычи нефти в период с 1993 по 2007годы, причём с 2008 по 2010 годы с ускорением, что находится в объективном соответствии с приведенными графиками просадок (рисунок 5).

Используемые для повышения дебита скважин методы гидроразрыва пласта и направленной разгрузки пласта, разработанные С.А. Христиановичем [6] вызывают сдвиговые напряжения, провоцирующие растрескивание и разрыхление за счёт высвобождения запасенной в ней упругой энергии сжатия от горного давления. Постепенное понижение давления за счёт отбора нефти вызывает уплотнение разреза и сопровождается просадками. По мнению Н.П. Лебединец [7] «на месторождении Тенгиз, как и по Грозненским верхнемеловым залежам, эффективная проницаемость и емкость коллекторов, по-видимому, обусловлены в основном пустотами вторичного происхождения (трещинами, порами выщелачивания, кавернами) с гораздо большими характерными линейными размерами, чем у первичных пор и поровых каналов». И можно предполагать, что весь продуктивный массив эффективно контролируется трещиноватостью и «взаимувязываются между собой также величины пластовых давлений, замеренные в разных частях продуктивной толщи» [7].

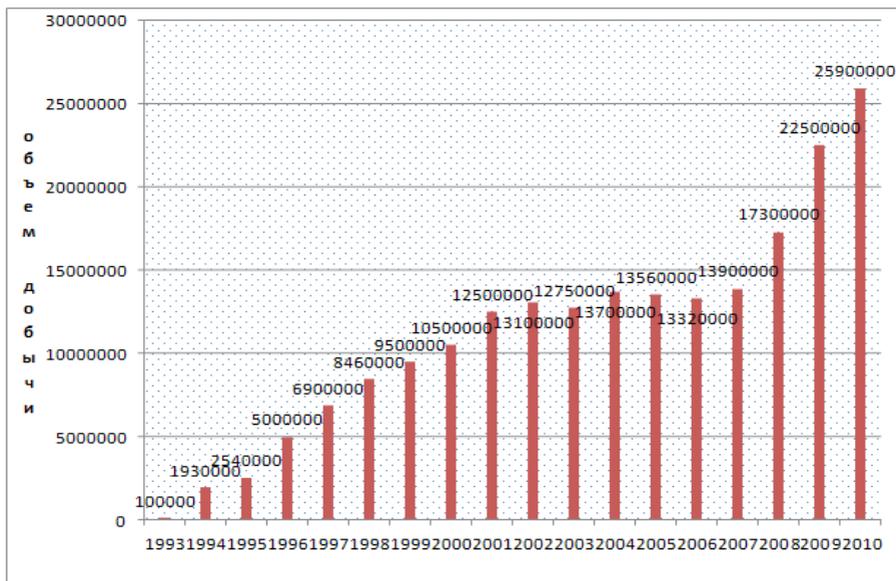


Рисунок 7. Диаграмма зависимости объёма добываемой нефти на месторождении Тенгиз в течение 1993-2010 гг.

Таким образом, можно считать, что тотальная трещиноватость коллектора и неизбежное снижение пластового давления, а также местоположение и количество добывающих скважин, являются теми физическими факторами, которые определяют динамику просадок земной поверхности

### Список литературы

- [1] *Барабанов В.А.* Техногенные геофизические явления на месторождениях подземных вод, нефти, газа и твёрдых полезных ископаемых. // Наведённая сейсмичность, М., 1994.
- [2] *Болт. Б.А., Хорн У.Л. и др.* Геологические стихии. М., 1978.
- [3] *Гаттенбергер Ю.П.* Строение нефтяной залежи месторождения Тенгиз по данным о пластовом давлении. // Геология нефти и газа № 2, 1990.
- [4] *Жантаев Ж.Ш., Фремд А.Г. и др.* Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности над нефтегазовым месторождением Тенгиз. // Геоматика № 1, 2012.
- [5] История метода Георыхления. – <http://perfolink.ru/index.php?zi=66&chp=showpage&num=70> (март 2013).
- [6] *Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф.* Об упругом режиме эксплуатации нефтяного месторождения. Ж.Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990, № 1.
- [7] *Лебединец Н.П.* Геолого-промысловые особенности месторождения Тенгиз. // Геология нефти и газа, № 2, 1990.

## 1.2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ В РАЙОНАХ АКТИВНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

*Жантаев Ж.Ш.<sup>1</sup>, Передеро В.С.<sup>2</sup>, Виляев А.В.<sup>2</sup>, Серикбаева Э.Б.<sup>2</sup>*  
АО «Национальный центр космических исследований и технологий»<sup>1</sup>  
ДТОО «Институт Ионосферы»<sup>2</sup>

Как показывает мировой опыт и результаты работ универсальность данных ДЗЗ, масштабность обзора, возможность получения глобальной и локальной информации о природных и техногенных объектах и контроля динамики процессов в реальном масштабе времени, позволяет успешно их использовать для решения широкого спектра задач. В работе представлены результаты выявления зон с повышенным тепловым фоном и выражены спектральными аномалиями в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазоне.

Исследование распределения теплового потока поверхности Земли [1] проведено на основе измерений спутниковых радиометров «Advanced Very High Resolution Radiometer» (AVHRR) с ИСЗ NOAA и MODIS с ИСЗ EOS. Для картирования распределения потока инфракрасного диапазона выбраны спутниковые изображения в спектральных областях 3.7 мкм, и 10-11 мкм, соответствующих «окнам прозрачности» с минимальным ослаблением в атмосфере в ночные и предутренние часы локального времени преимущественно позднего осеннего и начала зимнего сезонов с целью минимизации влияния дневного, солнечного прогрева.

Сопоставление проводилось по отдельным сценам, их мультивременным комплексам и по усредненным данным за период наблюдений. В качестве дополнительной информации при анализе привлекались данные цифровой модели рельефа и карты распределения индекса состояния растительности –  $NDVI = (A2 - A1) / (A2 + A1)$ , где  $A1$  – величина альbedo поверхности в диапазоне спектра 0.5-0.6 мкм,  $A2$  – 0.7-0.1 мкм. Первичные данные, получаемые в результате обработки потока спутниковой информации, представлены в файлах формата HDF (Hierarchical Data Format). Формат HDF позволяет хранить в одном файле массивы научных данных, растровые изображения, атрибуты, а также группировать данные для получения структурных элементов более высокого уровня. В настоящее время формат HDF является основным форматом для хранения спутниковых данных EOS. Схема обработки информации поступающей со спутника до уровня L1B представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Последовательность обработки данных сенсора MODIS до уровня L1B

### 1.2.1 Методика расчета среднемесячных температурных полей земной поверхности

Вычисления температуры подстилающей земной поверхности выполнены по измерениям инфракрасных каналов MODIS. Данные уровня L1B - MOD021KM содержат информацию об интенсивности излучения в каналах с 20-го по 36-й. Использовалась также информация, находящаяся в продукте MOD03.

Выборка спутниковых данных (продукты MOD021KM и MOD03) произведена по пространственно-временным критериям и условиям представительности данных. Пространственным критерием является изучаемая геодинамически активная территория северного Тянь-Шаня, временным критерием – время суток, сезон (времена года) и год. Условием представительности служит качество данных, отсутствие облачности в исследуемом районе.

На этапе первичной обработки данных MOD021KM и MOD03 произведена проверка их целостности и выполнен анализ параметров HDF файлов с помощью программных продуктов HDF Explorer, HEG, HYDRA. Данные проанализированы в различных проекциях и каналах MODIS. Определена интенсивность излучения и радиояркостная температура поверхности для выбранных координат (рисунок 2). Выполнена верификация на отсутствие облачности над исследуемым регионом.



Рисунок 2 – Поле интенсивности излучения 32 теплового инфракрасного канала (продукт MOD021KM)

Для исключений внутридекадных вариаций температурных полей осуществлена выборка осредненных спутниковых данных за один месяц с построением среднемесячных композитных температурных полей по исследуемым территориям Северного Тянь-Шаня

Данные этапа обработки MOD11C3 LST представляют среднемесячный композит температуры и излучательной способности земной поверхности, с пространственным шагом 0,05 градуса. Результаты усреднены по времени и зенитному углу наблюдения для расчета дневных и ночных температур подстилающей поверхности.

В соответствии со спецификацией продукта MOD11C3 LST и на основе базы данных MOD11C2 LST, созданной на предыдущих этапах исследований, по ночным измерениям построены карты среднемесячных температурных полей за 2009 г.

Примеры рассчитанных полей среднемесячной температуры подстилающей земной поверхности по сезонам года в районах Заилийского Алатау приведены на рисунок 3.

Расчетные температурные поля отражают сезонный и внутригодовой температурный ход. Мозаичность и пестрота температурных полей связана с топографией местности, физическими особенностями и составом подстилающей

поверхности, теплофизическими свойствами почвы проявлением геодинамических процессов.

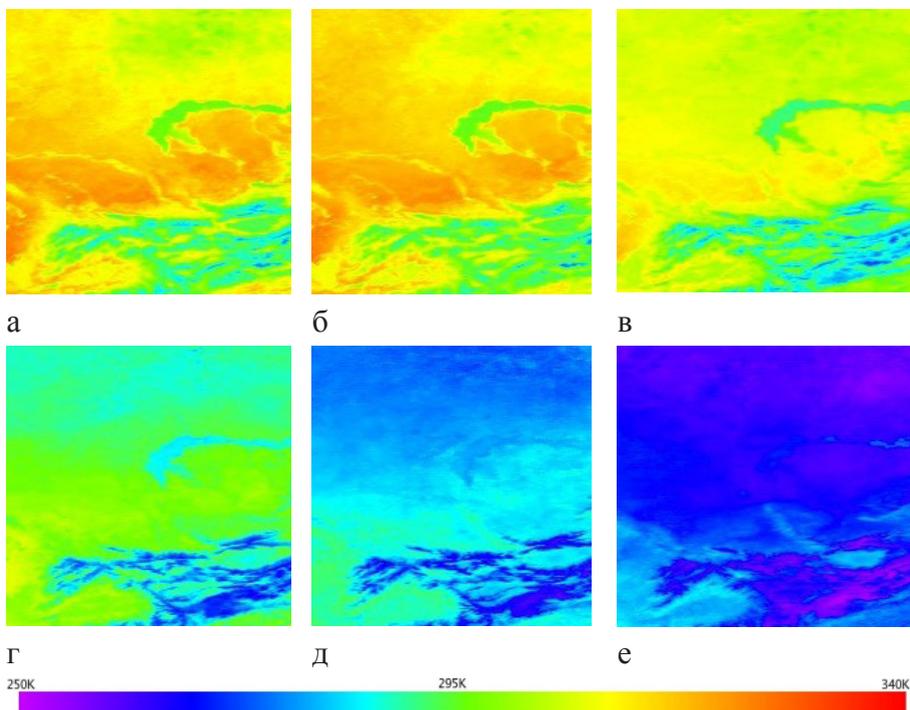


Рисунок 3 – Среднемесячные дневные поля температуры подстилающей поверхности за июль (а), август (б), сентябрь (в), октябрь (г), ноябрь (д), декабрь (е) 2010 года в районе Заилийского Алатау по данным прибора MODIS TERRA

### 1.2.2 Схема трансформации теплового поля для локализации аномалий

Для определения связи геологических и геофизических параметров геодинамической активности с полем теплового излучения по данным ДЗЗ выполнена обработка исходных тепловых снимков, таким образом, чтобы очистить его от влияния поверхностных эффектов. На рисунок 4 приведен исходный тепловой снимок радиометра MODIS для Северного Тянь-Шаня.

Тепловой режим недр определяется многими факторами: величиной теплового потока, направленного из глубинных частей Земли к поверхности; теплофизическими свойствами горных пород, обуславливающими их теплопроводность и теплоемкость; глубинами залегания и временем консолидации пород фундамента; различными физическими и химическими процессами, происходящими в осадочном чехле на различных стадиях литогенеза с выделением и поглощением энергии; наличием рифтовых систем; вариациями климата в

позднечетвертичное время и т.д. Снимок летний, поэтому на подавляющей части снимка зафиксированы положительные температуры, показанные теплыми тонами. Менее теплые тона отражают охлажденные участки гор Жетысуйского Алатау и Северного Тянь-Шаня, покрытые ледниками (рисунок 4).

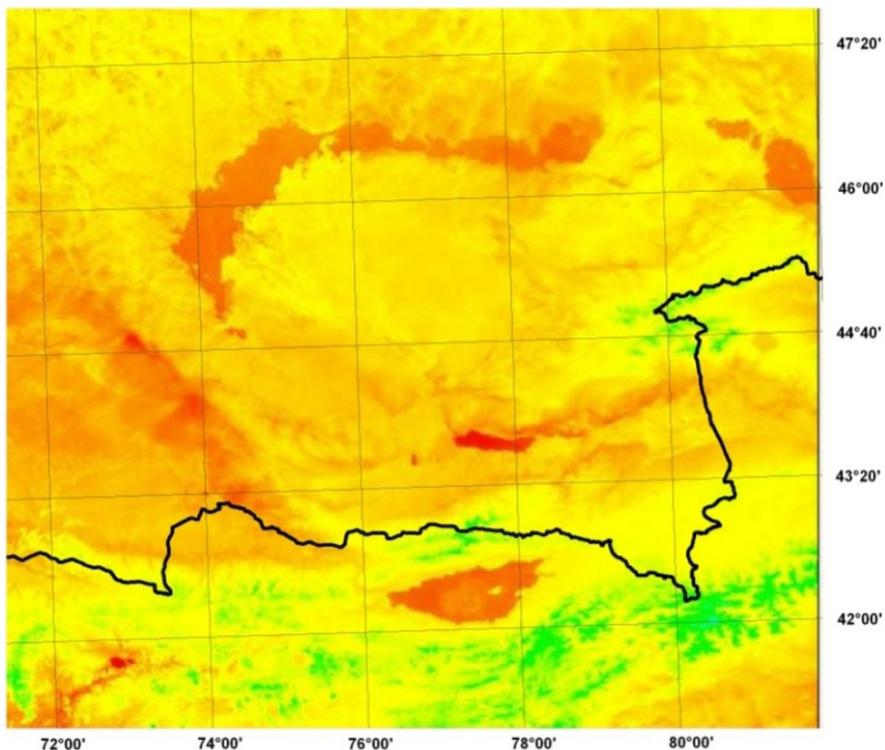


Рисунок 4 – Исходный тепловой снимок Северного Тянь-Шаня. (31 канал MODIS)

Любое аномальное поле представляет собой суперпозицию аномалий различных порядков. В зависимости от их размеров выделяют материковые, региональные (площадь тыс. и десятки тыс. км<sup>2</sup>) и локальные (до тыс. км<sup>2</sup>) аномалии [2].

При изучении локальных аномалий, имеющих наибольшее значение для разведочной геофизики, за нормальное поле принимается сумма нормального поля Земли и материковых и региональных аномалий. Основная задача при изучении аномального поля состоит в обнаружении и выделении тепловых аномалий, связанных с изучаемыми объектами, и в разделении аномального поля на составляющие различной природы. При этом применяются методы математической фильтрации, основанные на использовании моделей источников полей, аналитических свойств полей и особенностей морфологии и структуры поля. Предварительная обработка космоснимка заключалась в устранении

одиночных высокочастотных помех статистическим способом скользящего среднего и введением поправки на высокие значения водных объектов. На всех этапах применяется цветовое кодирование. В качестве фонового значения приняты минимальные значения производной функции от распределений. Результат расчета характеризует, в основном, региональную составляющую теплового поля.

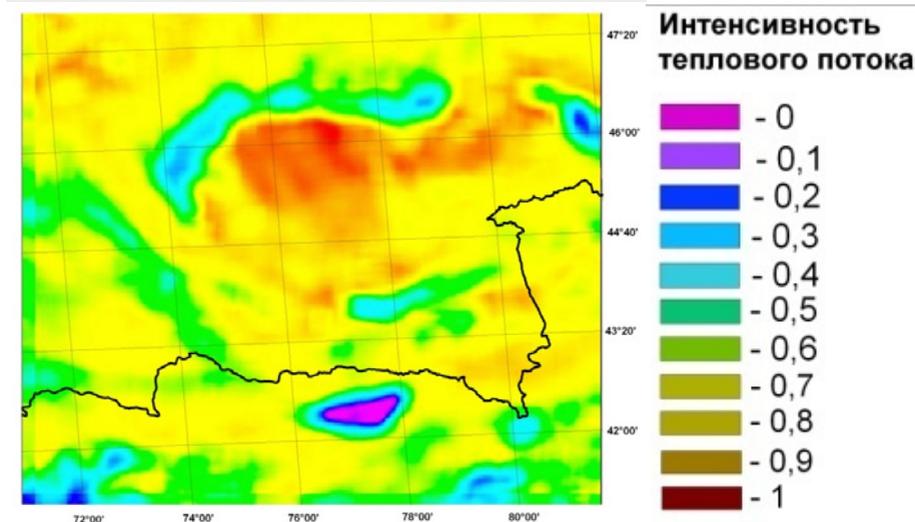


Рисунок 5 – Фоновые значения теплового поля Северного Тянь-Шаня

Фоновые значения теплового поля распределены неравномерно и в основном связаны с площадями распространения водных объектов, в том числе и их скрытые ареалы, расположенные на небольших глубинах (рисунок 5). Выделение фоновой составляющей теплового поля осуществлялось поэтапно, начиная с участков, наиболее ярко выраженных в спектре и, как правило, связанных с открытыми водными объектами.

Последующей обработкой были исключены все источники высокочастотного теплового спектра, связанные с влиянием мелкозалегающих локальных структур и осадочного чехла, перекрывающего исследуемый регион на большей части представленного снимка.

Локальные аномалии рассчитывались как разность наблюдаемого и фонового значения поля. Распределение тепловых аномалий выражено в условных относительных значениях. После выделения отдельных аномалий и разделения поля на составляющие различной природы осуществлена физико-геологическая интерпретация тепловых аномалий. Она включает установление геологической природы аномалий.

Результатом последовательной тематической обработки исходного теплового снимка стала схема разностного, локального теплового поля, представленная на рисунке 6.

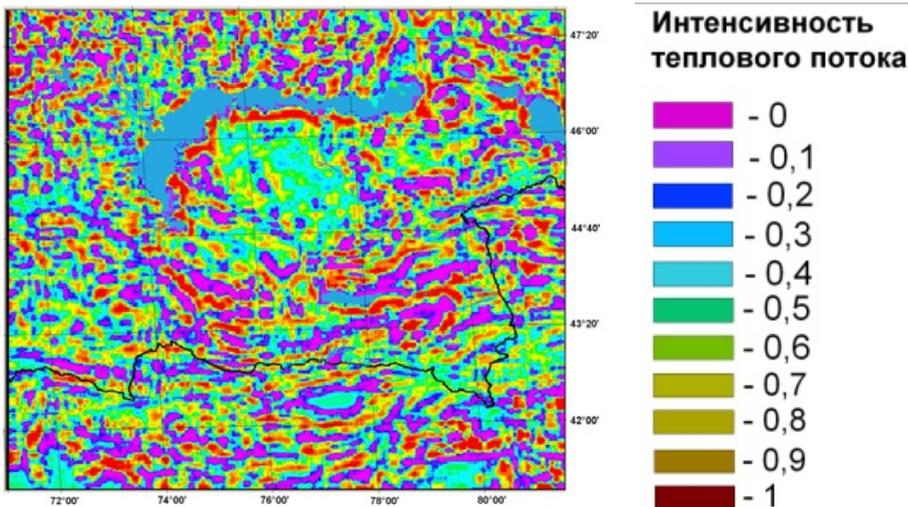


Рисунок 6 – Локальные аномалии теплового поля Северного Тянь-Шаня

Картина аномального теплового поля (рисунок 6) существенно отличается от исходного снимка (рисунок 4) и от фоновых значений теплового поля (рисунок 5). Основное отличие заключается в мозаичности картины, локализации тепловых аномалий в виде вытянутых участков различного направления и формы. Вдоль горных сооружений Северного Тянь-Шаня и Жетысуйского Алатау локализация аномалий ориентирована в широтном направлении. В западной части снимка аномалии имеют северо-западное направление. В других частях отмечаются множественные аномалии хаотической структуры. Южнее озера Балхаш наблюдается кольцевая структура с пониженными значениями температур.

Для выявления природы аномального теплового поля (рисунок 7) выполнено качественное сравнение с распределением геодинамических параметров региона, в частности с разломно-блоковой тектоникой [3].

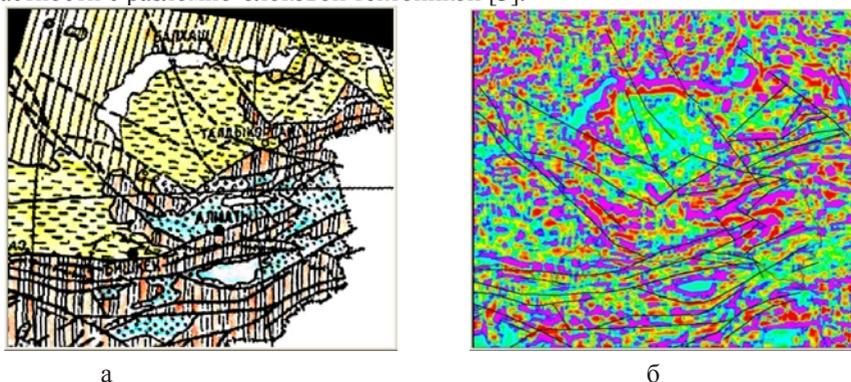


Рисунок 7 а – Неотектоническое районирование Казахстана (В.И. Шацлов, А.В. Тимуш); б – Аномальное тепловое поле Северного Тянь-Шаня с наложенной сеткой основных тектонических нарушений региона

Отмечается совпадение большей части разломов широтного направления с вытянутыми аномалиями повышенного теплового поля. Для разломов других направлений такое совпадение наблюдается только на западном участке снимка. Такое совпадение вытянутых зон аномального теплового поля и тектонических нарушений можно трактовать как отображение в аномальном тепловом поле активных в настоящее время разломов. Это становится наиболее очевидным, если рассматривать разломы других направлений, которые были активны в прошлые геологические эпохи, что и находит подтверждение на рисунке 7.

Активные разломы трассируются в аномальном тепловом поле локальными участками. Этот факт также может свидетельствовать о степени активности разломов на момент съемки, позволяя делать градацию тектонических нарушений по степени их активности. Прикладное значение этого результата может быть использовано при определении возможных очаговых зон землетрясений в сейсмоопасных регионах.

### **Список литературы**

[1] Вилор Н.В., Абушенко Н.А., Тащилин С.А. Спутниковый метод изучения корреляции инфракрасного эмиссионного потока и элементов геологической структуры Земли в северном полушарии. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Вып.3.т.2. М.: Институт космических исследований РАН. 2006. - с. 215-224

[2] Андреев Б. А., Клушин И. Г., Геологическое истолкование гравитационных аномалий, Л., 1965;

[3] Гархов А. Г., Бондаренко В. М., Никитин А. А., Принципы комплексирования в разведочной геофизике, М., 1977;

### 1.3 ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕДЛЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАЗАХСТАНА ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ (GNSS)

*Жантаев Ж.Ш.<sup>1</sup>, Виляев А.В.<sup>2</sup>, Бибосинов А.Ж.<sup>2</sup>,  
Садыков К.А.<sup>2</sup>, Асанкулов Н.А.<sup>2</sup>*

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»<sup>1</sup>  
ДТОО «Институт ионосферы»<sup>2</sup>

За последние два десятилетия роль GPS стала одной из главных в исследованиях современных медленных движений земной поверхности, как обладающей наибольшей чувствительностью к медленным движениям, и после применения определенной технологии наблюдений и обработки данных обеспечивающей приемлемую точность определения скоростных параметров. На территориях ряда государств непрерывно проводятся GPS-наблюдения, и особое внимание уделяется территориям со значительным сейсмическим риском. Передовыми в этом направлении являются такие государства, как США, ряд стран Европы, на Азиатском континенте подобные работы проводятся в Японии, Китае, Индии и других государствах. В используемой технологии много общих черт, а различия определяются лишь местными условиями и техническими возможностями.

Интерес к исследованиям современных движений и деформаций во многом обусловлен тем, что безопасное ведение человеком хозяйственно-экономической деятельности возможно только при получении целостной картины о происходящих в недрах Земли и на ее поверхности процессах. Мониторинг, направленный на обеспечение геодинамической и геоэкологической защиты окружающей среды, объектов природопользования и потенциально опасных производств с использованием инновационных наземно-космических методов исследования геодинамических процессов в земной коре, основанных на применении GPS-технологий, а также методов математического моделирования геомеханических процессов в земной коре, является научной задачей.

Существующие сейсмические риски в регионах Северного Тянь-Шаня и Жетысуйского Алатау продолжают возрастать, что обусловлено углублением урбанизации этих регионов и практическим отсутствием прогноза сейсмической опасности во всем энергетическом спектре известных здесь сейсмических событий. Появление новых технологий изучения геодинамических процессов, в частности, уже проведенные в Центральном Азиатском регионе исследования современных движений земной поверхности средствами космической геодезии и их интерпретация позволили установить четко выраженную пространственную приуроченность расположения эпицентров сильных землетрясений и найденных экспериментально параметров деформационных проявлений на поверхности.

В настоящее время ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ» совместно «Институт сейсмологии» МОН РК и АО «Национальная компания «Қазақстан Ғарыш Сапары» ведутся GPS-наблюдения в непрерывном режиме на Северном Тянь-Шане, Жетысуйском Алатау и в городах Алматы и Астана.

Для выполнения работы используются не только данные глобальных GNSS-сетей, а также созданная вблизи г.Алматы функционирующая локальная сеть непрерывных GPS-наблюдений, состоящая из 10 станций. Причем, 5 станций принадлежат ГУ «Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция» (СОМЭ) и 5 станций АО «НЦКИТ», и 10 станций АО «Национальная компания «Қазақстан Ғарыш Сапары». По результатам GPS-наблюдений на станциях локальной сети определяются особенности напряженно-деформированного состояния отдельных блоков земной коры для выявления связи между процессами деформирования и особенностями строения земной коры.

Для метрологического обеспечения выполнения работ использовались результаты GPS-наблюдений, выполненные на международном Центральном Азиатском геодинимическом полигоне с использованием современной аппаратуры, а также геолого-геофизические данные, обработанные и систематизированные в АО «НЦКИТ», «Институте сейсмологии» МОН РК и АО «Национальная компания «Қазақстан Ғарыш Сапары» в течение последних лет.

Для регионов Северного Тянь-Шаня и Жетысуйского Алатау создана уникальная система комплексного геодинимического и геофизического мониторинга, которая помимо решения основной задачи – прогнозирования сильных землетрясений, может быть ориентирован на решения и других народно-хозяйственных задач.

Идеализированная схема ведения мониторинга современных движений предусматривает использование непрерывных синхронизированных наблюдений в дискретных пунктах по всей контролируемой территории. Расстояния между пунктами должны быть не более половины размера ожидаемых областей экстремальных значений изучаемой величины. При этом использовались общепринятые принципы теоремы отсчетов (Котельникова), согласно которой точное воспроизведение непрерывной функции дискретными отсчетами возможно при соответствующей плотности пунктов и при ограниченном значении верхней частоты спектра изучаемой функции. Практически не все из этих условий могут быть соблюдены.

Основными выходными параметрами современных движений, получаемыми в ходе GPS-мониторинга, являются: взаимно ортогональные компоненты смещений для каждого пункта наблюдений, компоненты полных и (или) относительных значений скорости пунктов и, естественно, координаты пункта на каждый момент измерений.

Основными данными являются абсолютные значения названных величин, измеряемых в системе с началом координат в условном центре Земли (WGS-84). Начальные значения принимают за условный ноль. Для удобства анализа принято также отображать поля движений (скоростей пунктов в виде векторов) относительно отдельных блоков, характеризуемых выдержанным направлением и величиной абсолютной скорости точек поверхности в пределах блока. Как показывает практический опыт мониторинговых GPS-наблюдений, графики движений (смещений) пунктов поверхности имеют сложный вид. Это указывает, что их составляющие имеют различное происхождение и различное физическое

содержание, отразившееся в форме движений пунктов. Дальнейшее использование этих данных для интерпретации и в конечном итоге геодинамического истолкования требует надежной однозначной идентификации составляющих зарегистрированного процесса. В основе такой идентификации лежит определенный набор априорных знаний и данных, полученных разными путями в процессе достаточно длительного опыта работ. Для интерпретации полученных исходных данных, в частном случае представленных графиками условных смещений, требуется разделение зарегистрированной аддитивной суперпозиции на независимые составляющие, которые могут быть надежно идентифицированы как следствия отдельных независимых факторов воздействия. Действительно, если формально продифференцировать графики смещений ортогональных компонент пунктов, получатся графики величины, имеющие размерность скорости, но слагаемые этой скоростной зависимости непосредственно не проясняют природу формальных скоростей и в общем виде по величине могут не соответствовать реальным значениям скорости.

Главными моментами предварительной обработки явились: редактирование исходных данных полевых наблюдений, формирование базы данных из Мировой сети IGS, проведение тестовых расчетов, коррекция данных, ведение окончательных расчетов результативных данных, формирование базы результатов обработки. Составы этих и других используемых процедур подробно профессионально изложены в сопроводительной документации GAMIT/GLOBK.

Формально ошибки наблюдений с использованием GPS могут быть оценены путем сравнения полученных результатов наблюдений с некоторым эталоном. Основная сложность состоит в том, что эталон приходится использовать в виде некоторого условия, а не в виде независимого объекта, или образца. Это связано с тем, что априорно бывает известна лишь качественная характеристика эталона, например, возможная длительность процесса, пределы изменения параметра, особенности временного ряда и т.д. Среднеквадратическое отклонение координаты пункта оценивается при каждом независимом измерении, его положение меняется лишь за счет ошибок, фактически оставаясь неизменным.

При этом дисперсия определяется как:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

Стандартное отклонение (оценка среднеквадратического отклонения случайной величины  $x$  относительно её математического ожидания на основе несмещенной оценки ее дисперсии):

$$s = \sqrt{\frac{n}{n-1} \sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

где  $\sigma^2$  — дисперсия;  $x_i$  —  $i$ -й элемент выборки;  $n$  — объём выборки;  $\bar{x}$  —

среднее арифметическое выборки:

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + \dots + x_n) \quad (3)$$

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + \Delta x_i \dots + x_n + \Delta x_n) \quad (4)$$

в котором  $\bar{x}$  – среднее арифметическое одной сессии наблюдений на пункте,  $\Delta x$  – знакпеременная в общем случае погрешность каждого измерения в сессии.

Приняв к сведению, что в сессии на одном пункте  $P_k$  результат каждого независимого измерения содержит истинное значение измеряемой величины совместно с аддитивной неизвестной случайной погрешностью с различными знаками, получим при нахождении среднеарифметических оценок с ростом числа наблюдений в сессии приближение результата к истинному значению и стремление помехи к нулю [1, 2]. Однако практически это возможно, если среди независимых определений в сессии нет ошибок к «ураганным» значением. Такие определения необходимо исключать из числа наблюдений при редакции. Таким образом, используя многократные наблюдения на разных этапах мониторинга осуществляют накопление полезной информации. При случайной помехе

соотношение сигнал/помеха растет пропорционально  $\sqrt{n}$ . В качестве элементов накапливаемой информации можно использовать и результаты, получаемые на этапе обработки сессий наблюдения.

#### *Элементы предварительного анализа данных мониторинга*

После этапа предварительной обработки данных GPS-наблюдений начинается этап интерпретации, конечной целью которого является выход на количественные и качественные признаки происходящего геодинамического процесса или на решение поставленной конкретной геодинамической задачи. Существуют некоторые общие позиции интерпретации данных, которые обязательны при мониторинге, но могут производиться с множеством различий. В их числе можно выделить следующие:

- анализ качества предварительной обработки данных мониторинговых GPS-наблюдений;
- формирование необходимого набора выходных данных для последующего анализа;
- создание базы выходных данных предварительной обработки;
- расчеты производных величин от исходных данных и формирование соответствующих баз данных, в том числе составляющие тензора деформации поверхности, циркуляции, дивергенции, ансамблей линейного относительного деформирования по различным азимутальным направлениям, составляющих сдвиговой деформации;

- построение карт рассчитанных параметров движения и деформирования поверхности;
- карты абсолютных и относительных составляющих вектора горизонтальной составляющей скорости;
- отображение на картах положении эпицентров сейсмических событий различного ранга региона и другой сейсмологической информации;
- построение карт с указанием положения осей вероятных разрывных нарушений (живых) по данным о циркуляции горизонтальной составляющей скорости;
- выделение возможных активных разрывных нарушений сдвигового типа;
- а также других производных или дополнительных величин.

Выполнение перечисленных этапов возможно, если данные первичной обработки удовлетворяют определенным условиям, в которых исключены данные с «ураганными» отклонениями. Признаком достаточного качества является стабильность данных при независимых повторных вычислениях с использованием набора дополнительных станций мировой сети, которые являются стабильными. Это возможно, если условия распространения и приема сигналов опорных станций сохраняются, а станции работают стабильно. Выбранный комплект используемых станций мировой сети желательно сохранить постоянным на все время мониторинга. Предварительный анализ данных мониторинга, таким образом, в основном носит экспертный характер и требует участия квалифицированных специалистов, имеющих соответствующий опыт работ.

На рисунке 1 представлена мировая глобальная сеть GNSS станций (красным квадратом выделена область исследования).

На приведенных рисунках 2 и 3 показаны поля скоростей современных движений земной поверхности для компонентов запад-восток и юг-север для фрагмента Центрально-Азиатского полигона в пределах Северного Тянь-Шаня.

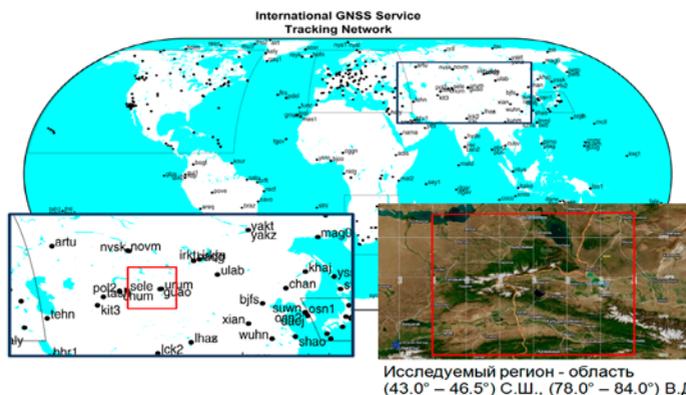
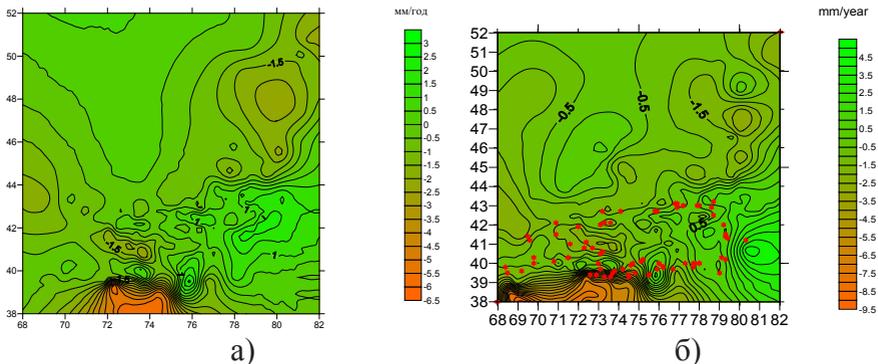


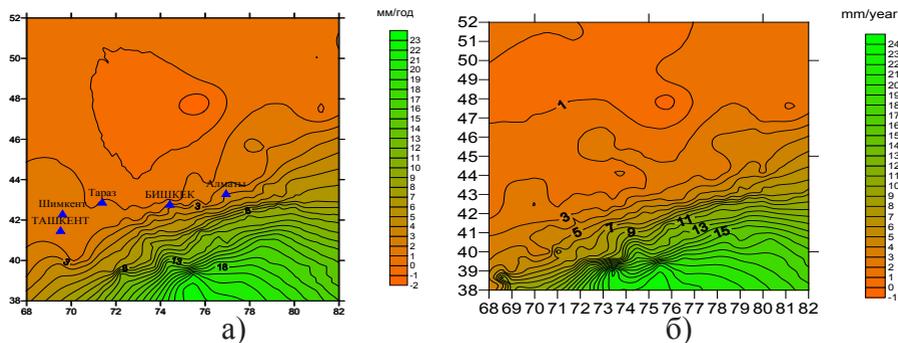
Рисунок 1 – Определение трендовых движений земной поверхности исследуемого городского региона с использованием данных глобальной и локальной сетей GNSS станций за 2011 год



а – по материалам предыдущей версии каталога;

б – по материалам обновленной версии каталога. Звездочками показано положение эпицентров сильных землетрясений.

Рисунок 2 – Поле горизонтальной скорости движений земной поверхности Северного Тянь-Шаня для составляющей запад-восток



а – по материалам предыдущей версии каталога;

б – по материалам обновленной версии каталога.

Рисунок 3 – Поле горизонтальной скорости движений земной поверхности Северного Тянь-Шаня для составляющей юг-север

Карты отображают распределение полей скоростей по предыдущей версии каталога скоростей и по его новейшей редакции. Таким образом, продемонстрированы отличия в результатах вычислений и интерпретации материалов многолетних GPS-наблюдений на полигоне. Предыдущий этап интерпретации материалов GPS-наблюдений был ограничен 2006 годом, а настоящий – включает весь период наблюдения по 2010 год. В расчетные параметры включены только те пункты, которые участвовали не менее чем в трех сессиях измерений и погрешность определения скорости их перемещения не превышает уровень 1мм/год. Такой подход к формированию исходных данных оправдан с позиций надежности представленных материалов, а исключение очень небольшого числа пунктов из расчетной схемы ни в коей мере не влияет на конечный результат, поскольку плотность размещения GPS-пунктов в наиболее

высокоскоростной области региона достаточно высокая.

Как видно на приведенных рисунках (рисунки 2 и 3), имеются некоторые различия в полях скоростей горизонтальных движений земной поверхности, связанные, как это уже было отмечено выше, с технологией обработки результатов наблюдений. При этом картина распределения поля скоростей по данным каталога последней редакции имеет несколько большую детальность. Ориентация изолиний равных скоростей в большей степени соответствует общему характеру распределения геолого-тектонических структур региона и практически не изменилась по сравнению с предыдущей эпохой интерпретации.

Однако следует рассмотреть выявленные отличия для двух эпох интерпретации. Так, поле горизонтальной скорости современных движений земной поверхности (СДЗП) для составляющей запад-восток претерпело некоторые изменения в центральной части исследуемого региона – оно приобрело большую детальность, что связано с вовлечением в обработку большего числа пунктов. В тоже время, мозаичность структуры поля для предыдущей версии каталога сменилась на более упорядоченный вид широтной зональности зон равных скоростей для обновленной версии каталога, что более согласуется с распределением тектонических структур региона. Также следует отметить факт выявления на юго-востоке региона еще одной локальной зоны пониженных значений скорости СДЗП, что объясняется наличием переходной зоны, разделяющей структуры Северного Тянь-Шаня и Жетысуйского Алатау, которые различаются и в тектоническом плане. Ранее эта зона не была выявлена по причине отсутствия в ней точек GPS-наблюдений [3].

Для составляющей скорости СДЗП по направлению юг-север таких существенных изменений не отмечено. Вероятно, это является свидетельством преобладающего значения скоростей горизонтальных движений земной поверхности, на фоне которых мелкие неоднородности в поле скоростей СДЗП проявлены слабо.

Обработанные данные скоростей движения пунктов GNSS-наблюдений позволили определить трендовое направление для сеточной модели исследуемого региона, для каждой ячейки сетки значение было получено путем линейной интерполяции Жетысуйского Алатау (рисунок 4).

По полученным обработанным GPS-данным с глобальной и локальной сети видны зоны сжатия и относительного растяжения земной коры исследуемого региона. Данные о скорости движения земной поверхности относительно Евразийского континента показывают, что горные хребты попадают на зоны кручения, что не отражается в абсолютных скоростях (рисунок 4).

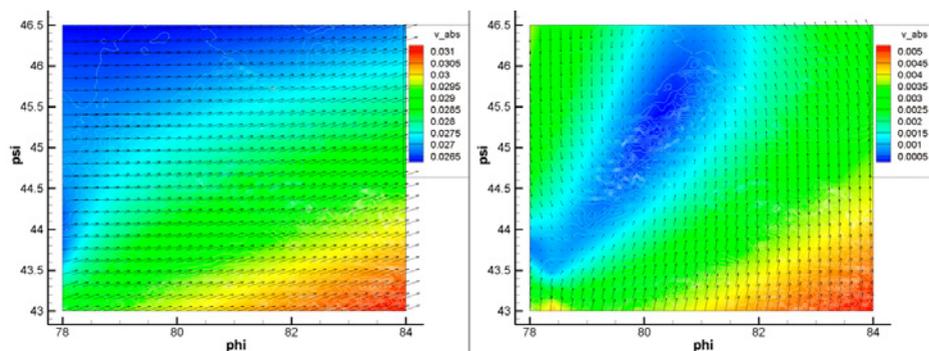


Рисунок 4 – Движение земной поверхности, относительно центра земли (слева)  
и относительно Евразийского континента (справа)

Непрерывно действующий мониторинг в регионах Северного Тянь-Шаня и Жетысуйского Алатау сможет значительно продвинуть проблему прогноза, тем более, что предлагается использовать новейшие средства расчета моделей земной коры и на примере этого региона оценить новейшие идеи о георезонансах собственных колебаний Земли и вынуждающих приливных воздействиях, как о ранее неизвестном спусковом механизме сильных землетрясений на фоне деформационных процессов в земной коре под действием внутренних тектонических и сейсмических факторов [4].

Развертывание Казахстанской сети GPS-приемников, предназначенной для непрерывного мониторинга движения земной коры, позволяет на этой же базе наладить службу непрерывного мониторинга ионосферы с целью выявления ионосферных предвестников землетрясений по уже существующим методикам, а также проведение исследований, направленных на дальнейшее развитие методик. Служба непрерывного мониторинга электрического поля Земли в сейсмоопасном регионе Северного Тянь-Шаня и Жетысуйского Алатау также позволит выявить региональные эффекты, как в нижних, так и в верхних областях атмосферы, предшествующие землетрясениям.

*Изучение современных движений поверхности урбанизированных территорий с помощью GPS-наблюдений на примере г.Алматы*

Исследования в данном направлении ведутся с 2009 года в рамках программы «Прикладные научные исследования в области космической деятельности». За эти годы проведены работы по созданию локальных сетей GPS-измерений вокруг г. Алматы, а также по созданию методик по их обработке. Настоящие исследования являются продолжением работ по разработке современных методов наземно-космического мониторинга и исследования напряженно-деформированного состояния верхних слоев земной коры на территории промышленных агломераций, урбанизированных территорий, в том числе в городах с высотной застройкой.

Работы, проведенные ранее в г.Алматы по микросейсмрайонированию, сейсмрайонированию территорий, изучению вертикальных движений методами наземного повторного нивелирования и другие виды работ, в некоторой степени

устарели. В г.Алматы постоянно действует лишь сеть станций сильных движений Института сейсмологии МОН РК, в основном для оценки сотрясаемости территории.

Перспективность предлагаемых исследований определяется тем, что потребность в мониторинге в условиях существующих рисков присутствует постоянно, а новизна предлагаемых технологий наземно-космического мониторинга обеспечивает долговременность использования разработок, которые имеют большие возможности для совершенствования.

Предлагаемая технология впервые позволит без значительных затрат вести непрерывные наблюдения современных движений и рассчитывать временной ход сопровождающих их деформационных проявлений. На данном этапе пока отсутствуют опыт ведения таких исследований и используемых технологий. Учитывая рельеф, гидрогеологические и инженерно-геологические условия городов Алматы и Астана, наличие сети разрывных нарушений разного масштаба, проходящих через город, проведение работ по мониторингу геодинамических процессов на территории этих городов является важным для целей промышленного, гражданского наземного и подземного строительства.

С позиций геодинамики необходимость постановки работ диктуется тем, что г.Алматы расположен в предгорном прогибе, развитом между Казахстанским щитом на севере и орогенами Северного Тянь-Шаня. Предгорный прогиб является частью общего прогиба основания коры под орогенами и продолжает формироваться совместно и в настоящее время. Следствием этого процесса является сеть разрывных нарушений, прослеживаемая и в пределах границ города. Амплитуда смещений по некоторым из них достигает сотен метров. Таким образом, сеть молодых крупных разломов может существенно определять распределение деформаций толщи коры в пределах городской черты.

Актуальным является непрерывный мониторинг в связи с резко изменившимся воздействием на верхнюю часть разреза земной поверхности в результате интенсивного строительства высотных зданий, сооружений и других объектов.

Необходимо использовать новые подходы к анализу прочности и устойчивости системы «грунт-сооружение». Высотное здание создает значительные нагрузки, проникающие на глубину и охватывающие большие объемы грунта. Переход слабых и обводненных грунтов в предельное состояние приводит к накоплению необратимых деформаций и, как следствие, к значительным осадкам здания. В результате неоднородность распределения деформаций вызовет опасные наклоны для высоких зданий.

При этом значительно возрастает значение правильного определения начального напряженного состояния грунтового основания, интенсивности современных движений земной коры и сейсмической опасности от воздействия местных и удаленных землетрясений на территории г.Алматы и его частей. Требование комплексного учета перечисленных инженерно-геологических факторов диктует необходимость создания трехмерной электронной геомеханической модели напряженного состояния верхних слоев земной коры

для городов Алматы и Астана и других городов, крупных промышленных агломераций с использованием данных спутниковой геодезии, ДЗЗ и других геофизических методов.

Изучение современных движений в городских условиях имеет целый ряд специфических особенностей: геологические условия наблюдений, доступность мест для размещения пунктов сети, и, наконец, характер действующих помех. Все эти обстоятельства были предварительно исследованы и по возможности учтены. Обычно в практике постановки мониторинговых GPS-наблюдений некоторые условия ведения работ приходится анализировать в течение всего времени наблюдений, так как большинство из них не зависят от исполнителей, нередки случаи, когда приходится переносить пункты, принимать другие меры. В нашем случае, факторов, которые могут повлиять на результат достаточно много. Так, например, для работ с учетом задач необходимо использовать сети с капитальными, долговременными пунктами, что и делается в мировой практике постановки GPS-мониторинга. На данном этапе это практически исключено, так как требует правительственного решения и активного вмешательства в градостроительные планы и учета уже построенных объектов. Но, тем не менее, на первом плане стоят вопросы, обусловленные геологической обстановкой.

В связи с этим необходимо создание специализированных карт достоверной оценки и прогноза состояния земной коры территорий промышленных агломераций, городов с высотной застройкой в целях обеспечения безопасного их развития с использованием данных спутниковой геодезии, ДЗЗ и других геофизических методов.

Данные GPS-мониторинга по городу Алматы предполагалось использовать для определения характера действия тектонической составляющей, которая эволюционирует с малой скоростью, что позволяет ее рассматривать как постоянно действующие неоднородности деформационного процесса. Другого характера составляющие деформирования – это сравнительно быстропеременные процессы, обусловленные сезонностью, характером осадков, солнечной активностью и др.

В совокупности названные обстоятельства определили и главную стратегию исследований, которая заключалась в проведении полевых наблюдений в доступной методической конфигурации, предварительной (первичной) обработке данных с ранее созданным и апробированным комплексом GAMIT/GLOBK, предоставленным разработчиками Массачусетского Технологического университета (США) и специалистами Центрально-Азиатского института прикладных исследований Земли (Кыргызстан, г. Бишкек).

Локальная GPS-сеть для г.Алматы состоит из 14 пунктов, месторасположения которых приведены на рисунке 4 и в таблице 1. В связи с отсутствием измерительной аппаратуры и условий ее массового применения, наблюдения выполнялись в режиме последовательных непрерывных наблюдений.

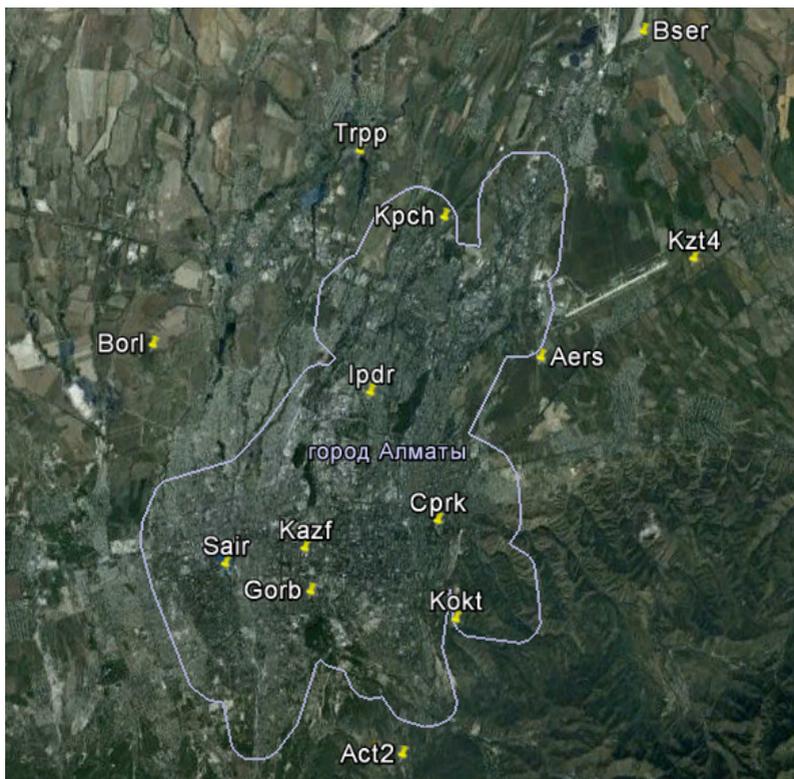


Рисунок 4 - Расположение пунктов локальной GPS-сети для г.Алматы

Смещения пунктов представляют часто в виде последовательного наращивания значений компонент по мере увеличения числа последовательных независимых сессий измерений, соотносенных с единым временем системы GPS. Так как на каждом пункте производят многократные независимые измерения, то обычно за измеренное значение в конкретной сессии принимают некоторое обобщение всех независимых измерений. В нашем случае такое обобщение проводилось за время 1-й или 2-х суток, в течение которых выполнялись дискретные измерения с интервалом 30 секунд, считающиеся непрерывными. По разным причинам в ансамбле могли быть существенные выбросы, явно не связанные с ходом динамического процесса. При обобщении данных за цикл с использованием, например среднеарифметических или среднеквадратических значений, результат обобщений существенно зависит от этих выбросов. Тогда и вся временная последовательность таких обобщений, построенная за некоторый длительный срок, также будет отягощена этими выбросами, т.е. «ураганными» ошибками. Одним из эффективных приемов исключения влияния «ураганных» отклонений является применение для обобщений ансамблей промежуточных результатов, медианных значений по каждому из ансамблей. Используют также

замену «выброса» среднеарифметическим двух соседних измерений. Несмотря на наличие сильной зависимости среднеарифметических значений от грубых ошибок, для обобщения непрерывного ансамбля измерений используют именно среднеарифметические значения, так как они дают оценку наиболее вероятных значений.

Для возможности оценок всей совокупности сказывающихся на смещении факторов, необходимо, чтобы протяженность рядов была представительной по отношению к ожидаемой протяженности циклов (периодов) составляющих циклических факторов, но не менее длительности одного цикла. Идеальным вариантом для удовлетворения этим требованиям является применение непрерывного ряда дискретных измерений общей протяженностью не меньше, чем величина периода наиболее низкочастотного процесса. При этом временной интервал между отдельными дискретными измерениями должен быть на много меньше периода самого высокочастотного ожидаемого циклического процесса. Легко видеть, что сказанное здесь аналогично требованиям при дискретном представлении данных, в виде непрерывных функций на основании теоремы «отсчетов» (теоремы Котельникова).

№	Название пункта	Пункты	Координаты		
			Y	X	H, м
1	База	Baza	43°10'37.1850	76°57'4.0122	1209.896
2	АФИФ им. В.Г.Фесенкова	Act2	43°10'35.7349	76°57'58.5639	1316.425
3	Коктобе	Kokt	43°13'40.7683	76°59'06.7640	925.288
4	Аэропорт	Aers	43°19'38.9931	77°0'46.2605	639.803
5	Сайран	Sair	43°14'17.5640	76°51'54.7307	757.792
6	Кызылту-4	Kzt4	43°22'13.5082	77°5'5.0653	634.481
7	Капчагайская трасса	Kpch	43°22'30.8869	76°57'20.5690	614.688
8	Байсерке	Bser	43°27'8.1595	77°2'46.2691	573.468
9	Бурундайское кладбище	Borl	43°18'56.6571	76°48'56.5204	727.569
10	Первомайский пруд	Trpp	43°23'46.1461	76°54'32.1729	620.963
11	Ипподром	Ipdr	43°18'27.0849	76°55'42.3869	668.996
12	12-ая Горбольница	Gorb	43°13'54.3048	76°54'36.2963	791.633
13	Мкрн. Казахфильм	Kazf	43°14'50.4854	76°54'15.9350	927.644
14	Центральный парк	Cprk	43°15'47.3451	76°58'12.4722	743.061

Таблица 1 - Название и координаты пунктов

Цикличность процессов, составляющих наблюдаемый ход движений, в определенной мере лишь некоторое приближение к реально происходящим процессам, так как реальные циклические процессы обычно сильно варьируют по интенсивности проявления, времени их начала и окончания. Так, например, выпадение осадков хоть и привязано по степени проявления

к определенным интервалам года, может иметь широкий спектр изменчивости по многим показателям. Соответственно непостоянны и обуславливаемые ими движения вещества верхней части коры. Аналогичным образом проявляется и температурный режим. Часто сторонние факторы являются сложным образом взаимно зависящими.

Из опыта работ установлено, что практически во всех регионах мира тектоническая составляющая смещения представляет прямую линию в зависимости от времени, что означает неизменность скорости современных движений, обусловленной перемещением крупных составных частей коры в течение практически доступной продолжительности наблюдений. Эта прямая линия может быть получена в явном виде из графика в виде системы точек дискретных наблюдений в результате нахождения регрессии системы точек графика, найденных из наблюдений. На фоне этой линии часто заметны почти периодические отклонения с цикличностью, в один год, или кратной этой величине. Также могут наблюдаться изменения, кратные  $\frac{1}{4}$  части года, особенно в регионах с выраженной сезонностью. Они обусловлены изменением погодных условий в соответствии с сезоном. Наконец, присутствуют процессы и с более малыми периодами, обычно проявляющиеся с меньшей амплитудой. Эти процессы часто имеют нестабильно проявляемые периодические вариации. Наконец, наибольшей частотой с периодом порядка суток отмечаются, похожие на шумы, квазипериодические процессы. В целом процесс, отображающий зависимость изменения составляющих смещений по ортогональным направлениям в локальной системе координат с началом в пункте наблюдений, представляет собой типичный фликкер-шум, для амплитудного спектра которого характерна зависимость вида  $1/f^k$ , где  $k$  – натуральное число. Наиболее высокочастотные составляющие обычно обусловлены ошибками отдельных определений смещений и являются следствием множества неопределенных факторов воздействия различного происхождения, как не связанных, так и сложным образом взаимно зависимых.

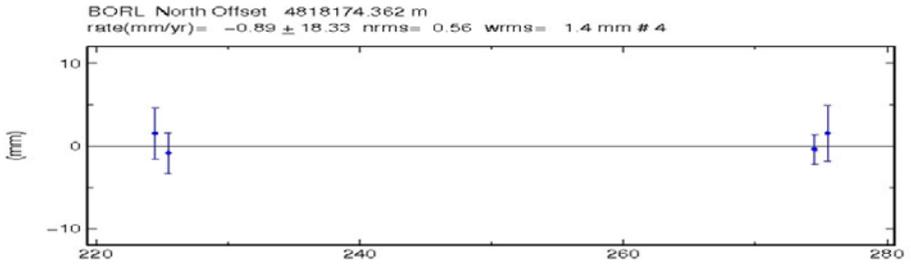
Наблюдения на мониторинговой сети желательно вести непрерывно и одновременно на всех пунктах. В случае невозможности обеспечить непрерывные синхронные наблюдения на всех пунктах сети, необходимо вести наблюдения последовательно на каждом пункте или системе части пунктов непрерывно в течение не менее 12-24 часов. Минимальный интервал определяется периодом обращения спутников (около 12 часов), в пределах которого изменяется погрешность определения координат в зависимости от фазы положения спутника на орбите.

В случае невозможности организовать синхронные наблюдения на всех пунктах сети, их желательно проводить, начиная и оканчивая в одно и то же время суток.

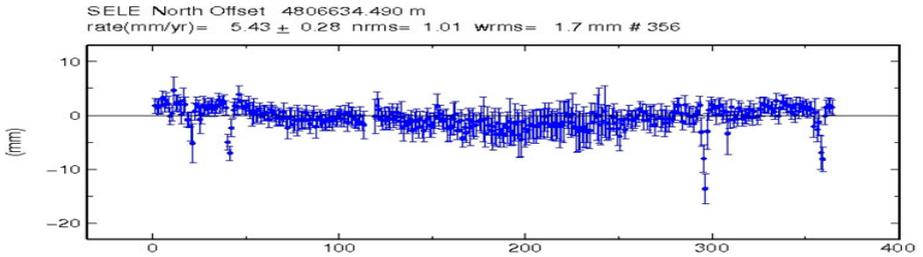
Как видно, при мониторинге возникает задача разделения полей смещений в зависимости от вызывающих их факторов. За основу берутся обобщенные сведения о свойствах смещений от различных факторов воздействия. Для успешного разделения в суперпозиции сигналов, представляющих в совокупности процесс современного движения точек поверхности, необходимо чтобы наблюдения

отвечали приведенным требованиям. Исходные геометрические параметры сети были заданы так, чтобы пункты располагались примерно в центральных частях проекции блоков фундамента, что необходимо для минимизации влияния на движения сложных процессов движения приразломных зон и одновременно выполнялись требования соблюдения принципа хаотичного расположения пунктов в пределах площади мониторинга. Это необходимо для одинаковой статистической представительности различных частей территории. На каждом намеченном пункте проводилась экспресс оценка качества приема по условию соотношения сигнал/сторонняя помеха по методике и программам фирмы LEICA – производителя используемой приемной аппаратуры. Кроме того, места расположения пунктов выбирались также и с учетом возможности проведения в них минимальных земляных строительных работ и безопасного расположения по отношению к городским коммуникациям различного назначения. Расположения пунктов были согласованы с городской администрацией, но впоследствии оказалось, что некоторые пункты были без предупреждения ликвидированы различными действующими хозяйствующими субъектами. Это один из существенных факторов стороннего влияния на мониторинг, который не всегда заранее можно учесть. Но наиболее существенным мешающим обстоятельством явилось то, что в городских условиях невозможно обеспечить сохранность оборудования при простейшей конструкции его инженерного оборудования. Из-за отсутствия приемных GPS-станций невозможно было обеспечить синхронный прием сигналов во всех пунктах и непрерывное их длительное регистрирование. Для оценки степени влияния комплекса негативных факторов было принято решение организовать наблюдения по простейшей, ранее отработанной схеме - в режиме последовательного посещения пунктов с непрерывным наблюдением на каждом в присутствии оператора в течение 1-2 суток с дискретностью независимых актов регистрации через 30 секунд. Использовался приемник многоканальный двухчастотный фирмы LEICA – FX1200PRO.

В конечном итоге это привело к малой плотности наблюдений по времени на каждом из пунктов. Выраженная сосредоточенность наблюдений к определенному календарному периоду из-за погодных и других условий не позволила достичь необходимой представительности данных. Как результат, ошибка таких наблюдений оказывается более, чем на порядок высокой в сравнении с данными на пункте SELE, также включенному в городскую сеть и одновременно в систему мировой IGS сети. Наблюдения на нем были начаты ранее и проводятся в непрерывном режиме и в настоящее время. Указанное различие во временных рядах данных на этих пунктах иллюстрируется на ниже приводимых рисунках 5 и 6.



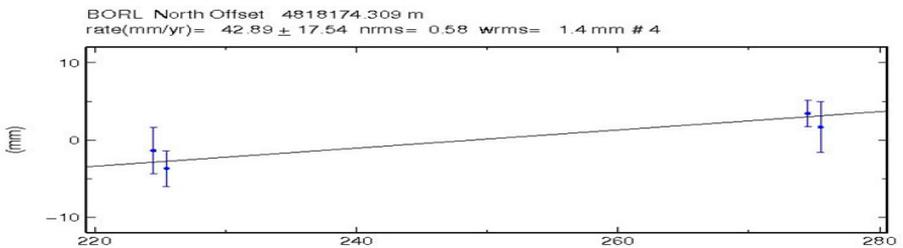
а) –временной ряд компоненты смещений юг-север пункта BORL за 2010 г.



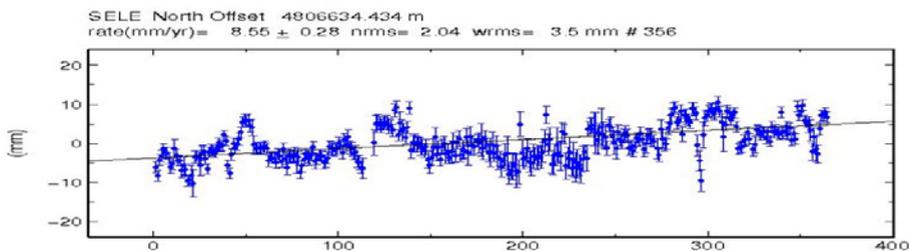
б) – временной ряд компоненты смещения юг-север пункта SELE за 2010 г. (сравните ряды в интервале дней 220-280 от начала года на горизонтальной шкале)

Рисунок 5 – Фрагменты временных рядов компонент смещений юг-север на полигоне г.Алматы за 2010 г. с исключенными линейными индивидуальными трендами

Рассмотренные примеры выделения прямолинейного тренда в рядах смещений фактически показывают разделение ряда на два слагаемых, одно из которых – ряд, аппроксимируемый прямой линией, а другое слагаемое – остаточный ряд, как разность между исходным и прямолинейным рядами. Операция называется регрессией исходного ряда на прямую линию. Математически она осуществляется в виде вычисления точек прямой линии, среднеквадратичное отклонение которых характеризуется минимумом для совокупности всех точек исходного и искомого рядов.



а) –исходный временной ряд компоненты смещений юг-север пункта BORL за 2010г.



б) – исходный временной ряд компоненты смещения юг-север пункта SELE за 2010 г. (сравните ряды в интервале дней 220-280 от начала года на горизонтальной шкале

Рисунок 6 – Исходные временные ряды компонент смещений юг- север на полигоне г.Алматы за 2010 г. с линейными индивидуальными трендами

Ряд в виде точек, укладываемых на прямую линию и наилучшим образом совпадающий с точками исходного ряда, вполне может служить моделью длительного движения с постоянной скоростью, характерной для континентального блока. Вычитая этот ряд из исходного ряда, в остатке получают суперпозицию смещений от движений с короткими циклами. Последовательно процесс может быть продолжен, но из-за неустранимых помех и дефектов исходного ряда можно рассчитывать на выделении лишь 2-3 циклических составляющих.

Другие подходы по разделению аддитивных составляющих временных рядов смещений могут быть построены на основании спектральных свойств (частотного состава) интерферирующих процессов. Нами эти подходы были опробованы в опытным порядке на реальных данных мониторинга. Для более широкого применения требуется развитие сервисного программного обеспечения.

Один из вариантов частотного временного разделения процессов в рядах смещений может быть основан на использовании вейвлет-анализа, позволяющего сигнал исходного ряда представлять в виде частоты по одной оси и времени появления в интервале исходного ряда по другой оси в декартовой системе координат с отображением интенсивности сигнала в каждой точке на плоском графическом изображении [см. [www.wavelet.org/](http://www.wavelet.org/); [www.mathsoft.com/](http://www.mathsoft.com/)].

Опробован и чисто спектральный метод, заключающийся в расчете гармонических составляющих спектра сигнала в виде исходного временного ряда. Так как гармоники таких спектров однозначно связаны с исходной длительностью ряда, то при различной протяженности рядов необходимо четко определять нижнюю и верхнюю границы спектра. Это позволяет однозначно сопоставлять спектры различных рядов.

Полезным преимуществом рассмотренных подходов является возможность очень корректной фильтрации сигналов, а также обратный синтез из спектров соответствующих им временных рядов.

### *Объединение наблюдений в единую систему мониторинга*

По мере развития мониторинга будет происходить не только рост объема данных, но и частичное изменение структуры и конфигурации сети. Это связано с неизбежной утратой части пунктов и появлением новых. Неизбежно также и расширение сети за счет расширения границ. При этом всегда территория городской сети будет представлять собой компактную структуру на контролируемой территории. Из имеющегося опыта видно, что данные мониторинга по величине смещений имеют циклический вид с выраженным годовым циклом. Менее протяженные циклы не всегда устойчивы, поэтому в базе данных желательно иметь фрагментирование данных по годам. При объединении данных за несколько лет необходимо быть уверенным в отсутствии тенденций к монотонности изменений или других выраженных закономерностей. Тогда в качестве параметра в объединенном ряду можно рассмотреть статистические параметры в виде средних арифметических или медианных значений. Данные о скоростях пунктов можно представлять в двух видах: в абсолютном значении в системе с началом в центре Земли, а также в относительном, например, с началом в некотором пункте со значениями, представляющими характерные особенности региона. Для Алматинского полигона таковым может быть, пункт SELE, находящийся в стабильных поверхностных условиях в скальных породах, входящем в число пунктов полигона и включенного в мировую сеть IGS. При таком представлении данных необходимо убедиться в отсутствии сильных неравномерных движений по крыльям разрывных нарушений, проходящих через территорию полигона. Рациональным может оказаться также и вариант с представлением движений относительно Европейской части Евразийского континента, так, как это делается сейчас при анализе современных движений Центрально Азиатской региональной сети GPS. В предыдущем отчете были приведены карты горизонтальной и вертикальной компонент скорости в рекомендуемых вариантах.

*Предложения по техническим и методическим аспектам на продолжение мониторинговых наблюдений за современными движениями поверхности на территории г.Алматы.*

Опыт мониторинговых наблюдений в г.Алматы в 2010-2011гг. позволил установить, что использование синхронных наблюдений весьма важно, так как оно автоматически устраняет ряд ограничений в методике и повышает степень достоверности конечных результатов.

Наиболее используемыми результатами мониторинга современных движений урбанизированных территорий являются абсолютные и относительные значения составляющих смещений и скорости смещений. При этом под абсолютными понимаются смещения и скорости смещений, найденные в результате первичной обработки в системе координат с началом в центре притяжения Земли (центре Земли). Относительные составляющие смещений и скоростей смещений – это соответствующие величины, найденные как остаточное поле после вычитания из абсолютных значений на каждом пункте значения, обобщающего движение

некоторой базовой территории или пункта. Для Алматинского полигона в качестве базового предлагается рассматривать пункт SELE, данные которого входят в базу мировой сервисной сети IGS.

Значительные расхождения карт компонент скоростей за два смежных года 2010 и 2011 указывают на вероятную сильную зависимость результатов наблюдений от календарных сроков, а также и на то, что проявленность факторов воздействия может быть существенной для различных пунктов. В этих условиях корректными могут быть лишь синхронные наблюдения, допускающие в некоторых пределах избирательно снижать взаимно мешающие влияния.

Таким образом, разработаны элементы технологического и инженерного оборудования пунктов GPS-наблюдений в пределах урбанизированных территорий, заложена основа сети наблюдений для наблюдений в режиме посещений на территории г.Алматы. Проведены мониторинговые наблюдения в 2010 и 2011 годы. В состав сети включен пункт SELE, заложенный ранее и включенный в мировую сеть IGS. Проведена предварительная обработка данных в комплексе GAMIT/GLOBK и установлено, что на новых пунктах с редкими во времени сессиями наблюдений (2 сессии по 2 суток непрерывно каждая) отмечается большая ошибка определения значений компонент скорости в сравнении с пунктами, на которых осуществляется непрерывный режим наблюдений в течение года (SELE). Предложены варианты снижения уровня помех при мониторинге за счет использования частичного разделения аддитивных процессов с использованием регрессии, частотного вейвлет-анализа.

Рассмотрен вариант мониторинга в виде интегральной оценки деформационных процессов на площади исследований с минимальным количеством синхронных приемников GPS-сигналов (вариант – полигон вокруг города в виде описанного треугольника), а также вариант в виде многоугольника.

Полезность мониторинговых наблюдений за современными движениями земной поверхности на территории г.Алматы, а впоследствии и других урбанизированных объектов в Казахстане, состоит в том, что впервые появляется возможность объективно увидеть степень негативного проявления постоянно действующих геодинамических процессов на инженерные объекты, оценить степень влияния на эти же объекты со стороны других факторов (сезонных, техногенных и быстро переменных космофизических воздействий), а также совместное влияние различных по физической природе воздействий на устойчивость гео-экологической системы урбанизированных территорий [5, 6].

На рисунке 7 представлены карты абсолютных скоростей городской сети GPS-измерений за 2011г. Скорости относительно Евразийского континента (слева) и относительно центра Земли (справа).

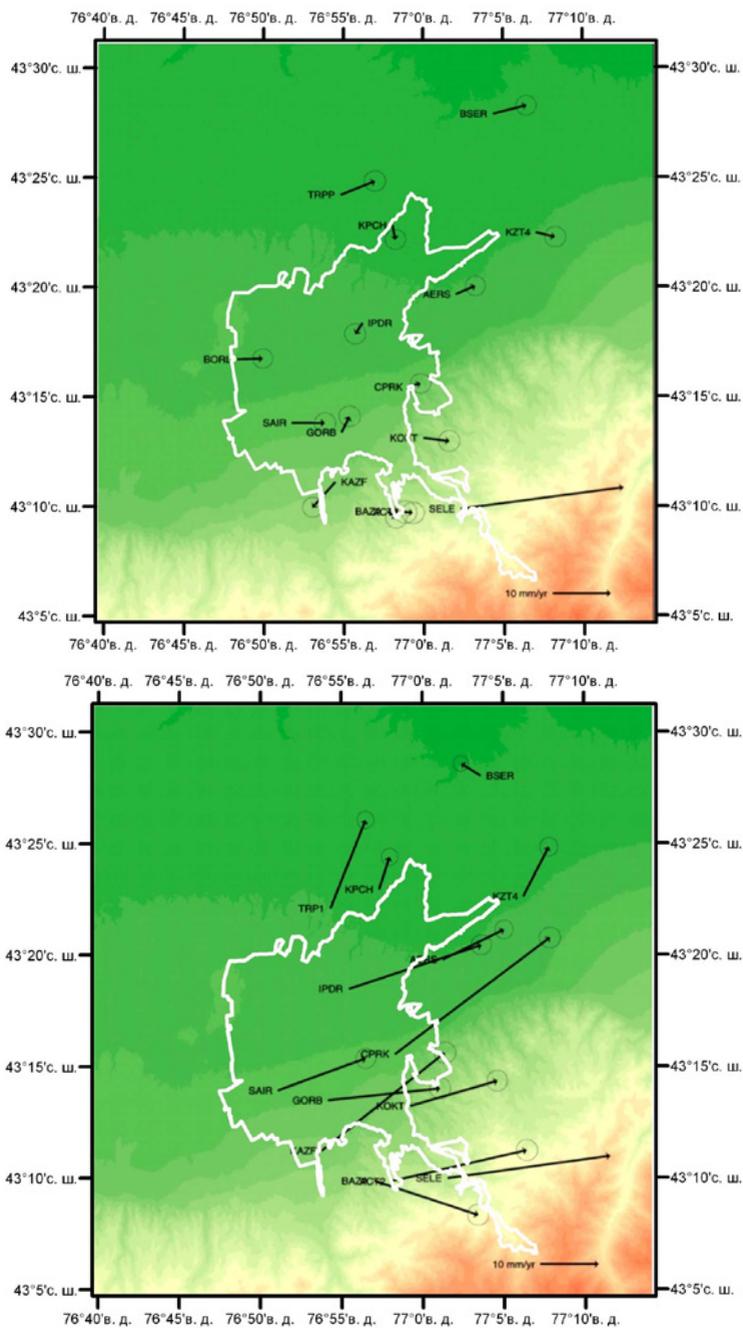


Рисунок 7 - Скорости городской сети GPS-измерений за 2011г. Скорости относительно Евразийского континента (слева) и относительно центра Земли (справа)

Таким образом, перманентная станция SELE, входящая в мировую сеть IGS, имеет ошибку порядка 0.1 мм/год, когда остальные временные пункты не отличаются высокой точностью измерений. Это указывает на необходимость разработки специальных мер по снижению погрешности на станциях городской сети до порядка 1-2 мм/год.

Проведенные впервые исследования на территории г.Алматы по разработке технологии изучения современных движений земной поверхности с использованием GNSS-наблюдений высокой точности показали, что в пределах урбанизированных территорий такие работы вполне возможны и необходимы. Основное преимущество работ с использованием такой системы – возможность получения одновременно параметров скоростей по трем взаимно ортогональным составляющим, характеризующимися значительными вариациями в течение года.

Ошибка вероятнее всего вызвана малым числом независимых наблюдений на временных пунктах, что обусловлено невозможностью организовать непрерывные наблюдения из-за отсутствия приемных устройств и плохой обеспеченности отряда транспортными средствами.

Установлены основные требования к системам наблюдений и инженерному оборудованию наземных пунктов наблюдений, а также разработаны и опробованы оригинальные технические решения пунктов, допускающие их строительство в городских условиях на основе долговременной базовой конструкции, погружаемой в грунт съемных элементов с блоком оборудования и антенным держателем.

За два года наблюдений на городской территории установлены признаки значительных смещений точек поверхности. Сделан вывод о необходимости ведения синхронных наблюдений на части пунктов, с последующим перемещением приемников на другие пункты с перекрытием систем наблюдений.

Для обеспечения высокого качества первичной обработки данных мониторинга необходим выбор с последующим контролем качества данных группы ближних непрерывных станций мировой сети (IGS).

Результаты работ могут быть использованы для развития системы мониторинга в регионе в целях прогноза геодинамического состояния земной коры и крупных сейсмических событий. Основным отличием от традиционных подходов является выявление аномальных зон по распределению геодинамических параметров, как результат геомеханического моделирования с использованием базы геолого-геофизических данных, готовившихся к неизбежному сейсмическому событию. Возможности и практичность предлагаемого подхода экспериментально подтверждены обнаруженной связью особенностей эволюционирующих деформационных процессов, распределением уже состоявшихся крупных землетрясений региона, наличием выраженных особенностей в деформировании поверхности, контролирующей сосредоточенность всех крупных землетрясений исследуемых регионов.

## **Список литературы**

[1] <http://www.jpl.nasa.gov/>

[2] <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/>

[3] Отчет о научно-исследовательской работе «Разработать методы и технологии оценки и анализа напряженно-деформированного состояния участков земной коры с использованием спутниковых технологий» (заключительный) за 2009-2011 гг.

[4] Отчет о научно-исследовательской работе «Разработать методы оценки геомеханического состояния земной коры кризисных территорий с использованием математического моделирования и спутниковых технологий» (промежуточный) за 2012г.

[5] Отчет о научно-исследовательской работе «Разработать технологии наземно-космического мониторинга геодинамических процессов на территории промышленных агломераций, городов с высотной застройкой» (заключительный) за 2009-2011 гг.

[6] Отчет о научно-исследовательской работе «Разработать методы математического моделирования и спутниковых исследований напряженно-деформированного состояния системы «грунт-сооружение» для промышленных агломераций и городов с высотной застройкой» (промежуточный) за 2012 г.

## 1.4 РАЗУПЛОТНЁННОСТЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА ПО ДАННЫМ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

*Жантаев Ж.Ш., Бибосинов А.Ж., Исаков Б. А., Құрманов Б.К., Фремд А.Г.*

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»  
ДТОО «Институт ионосферы»

Каспийский регион, в котором сосредоточены крупнейшие запасы углеводородного сырья, является сегодня крайне непривлекательным инвестиционным объектом экономик всех стран этого региона, а также других государств. Однако успешное развитие региона предполагает решение ряда вопросов, связанных с выявлением новых, перспективных на наличие углеводородов территорий на базе уже известных экспериментальных геофизических данных.

К обоснованию их распределения в Прикаспийском регионе прямое отношение имеют зоны разуплотнения (волноводы), которым отводится важное место в структуре земной коры. Их формирование и геодинамика обусловлены масштабными процессами, связанными с конвективными потоками и движениями плит на протяжении палеогеологических эпох, а также и современных, свидетелями которых, мы являемся.

Причиной тому, может служить установленная связь нефтеперспективных структур, а также сейсмогенерирующих зон с положением зон разуплотнения. Поэтому, выявление последних на сегодня представляется наиболее актуальной задачей, решение которой позволит проводить целенаправленные поисковые и разведочные работы, направленные на расширение минерально-сырьевой базы и, в частности, на выявление мест возможной локализации месторождений углеводородов.

На земной поверхности с зонами разуплотнения связаны многие элементы разломной тектоники, которые могут служить каналами миграции флюидов из внутрикоровых волноводов в приповерхностные коллектора, ограниченные сверху флюидоупорами. Наличие последних является необходимым условием накопления углеводородов в промышленных масштабах. В качестве примера можно привести ряд работ, в которых развиты и обоснованы эти положения [1,4,5,6,7]. Именно поэтому, выявление зон разуплотнения и их локализация поможет сузить ареал поисков месторождений углеводородов и расширить наши представления об их местонахождении.

Для решения поставленной задачи наиболее простым и целесообразным представляется использование экспериментальных данных о распределении значений скорости продольных сейсмических волн в земной коре. Поскольку скорость является интегральной характеристикой физических свойств геологической среды, то вполне уместно предположить, что карты распределения её значений несут в себе прямую информацию об интересующих нас объектах исследования, которые должны проявляться в виде областей относительно

пониженной скорости, распределённых в исследуемом объёме земной коры. Поэтому решение, в общем случае, сводится к выявлению этих областей и установлению физического смысла обнаруженных закономерностей путём анализа и сопоставления с фактическими геолого-геофизическими данными и выполненными модельными расчётами по распределению параметров напряжённо-деформированного состояния для отдельных локальных территорий, включающих в себя установленные месторождения углеводородов.

Распределение значений скорости сейсмических волн в разрезе рассматриваемого региона получено на основе материалов обобщения [2], представленного набором карт, отражающих рельеф основных скоростных уровней. Данный набор карт явился тем исходным материалом, который позволил составить представление о региональных особенностях распределения значений скорости продольных волн в земной коре Прикаспийского региона на всю его мощность – от земной поверхности до её подошвы (граница М).

Расчёт трёхмерных образов зон разуплотнения производился путём вычитания трендовых значений поля скоростей из наблюдаемых для каждой точки рассматриваемого объёма среды. Следует отметить, что решения такого типа нельзя считать формальными, так как они основаны на результатах полевых наблюдений.

#### **1.4.1 Особенности локализации и морфологии областей разуплотнения в верхней части разреза земной коры**

Результат выполненных расчётов представляется в виде 3D распределения скоростных неоднородностей в земной коре Каспийского региона. Для более тщательного анализа был выбран слой мощностью 7 км (от земной поверхности до глубины 7 км), в котором сосредоточены основные, продуктивные на углеводороды, горизонты, соответствующие подсолевым отложениям Прикаспийской впадины.

Путём прямого сопоставления местоположений месторождений углеводородов, как известных, так и менее значимых, с положением зон разуплотнения было выявлено их хорошее качественное соответствие. Практически, контуры всех крупных месторождений находятся в пределах зон относительно пониженной скорости с некоторым тяготением к границам областей разуплотнённых и относительно более плотных геологических образований, возможно являющихся флюидоупорами. Интенсивность выделенных зон разуплотнения в основном варьирует в пределах – (0,1-0,2) км/с и более, что является объективно значимой величиной.

Также установлено, что зоны относительно пониженной скорости (зоны разуплотнения) расположены не хаотично. Они формируют в границах Прикаспийской впадины внешнюю кольцевую продуктивную структуру, выделенную авторами более ранних работ. К этой структуре приурочен ряд известных месторождений, в том числе Тенгиз, Карачаганак, а так же Астраханское и Оренбургское. Их образование можно объяснить существованием проводящих каналов соединяющих коровый волновод, расположенный на глубинах 10-15 км и являющийся вместилищем углеводородосодержащих флюидов, выдавливаемых

в верхнюю часть разреза и аккумулирующихся в местах расположения рифов, которые являются хорошими коллекторами. Полученное 3D распределение подтверждает представление о флюидопроницаемости выделенного слоя, как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях (рисунок 1).

Из сказанного вытекает предположение, что последние могут являться коллекторами и иметь связь с вышележащими приповерхностными горизонтами посредством каналов миграции, фрагменты которых отображены на рисунке 1. А промышленные концентрации углеводородов или других видов минерального сырья могут формироваться только при наличии условий, способствующих их накоплению. Сопоставление построенных карт со схемой перспектив нефтегазоносности Каспийского моря [3], показало хорошее качественное соответствие в распределении нефтеперспективных областей, концентраций нефтепроявлений различной степени плотности, известных месторождений и скоростных неоднородностей (рисунок.2).

Полученные результаты дают основание предполагать, что зоны разуплотнения, выделенные по региональным данным, объективно отражают картину направленности флюидных потоков и аккумуляции углеводородов.

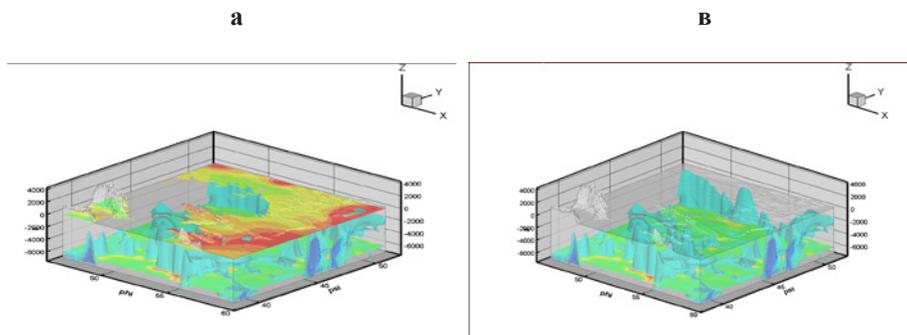


Рисунок 1. Распределение скоростных неоднородностей в земной коре Каспийского региона: А – с учётом рельефа земной поверхности и уровня  $h=6$  км; В – только с уровнем  $h=6$  км

Выявленные закономерности в распределении зон разуплотнения в комплексе с другими геофизическими данными могут служить дополнительным критерием при оценке нефтеперспективности территории и проведении поисковых геологоразведочных работ в Каспийском регионе.

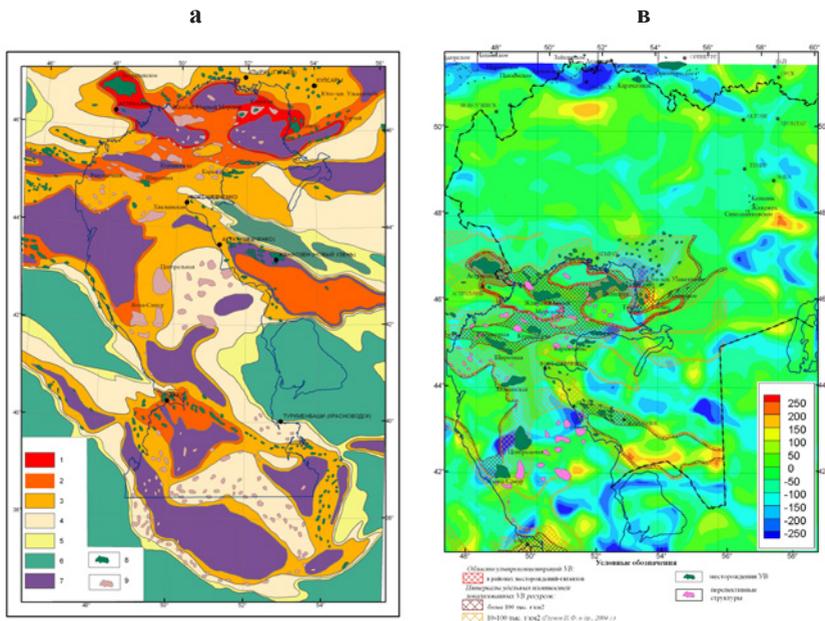


Рисунок 2 Схема перспектив нефтегазоносности Каспийского региона [3], (А) и карта распределения скоростных неоднородностей (В), где :1 – области ультраконцентраций УВ в районах месторождений–гигантов; Интервалы удельных плотностей локализованных углеводородных ресурсов: 2 – более 100 тыс. т/км<sup>2</sup>; 3 – 10-100 тыс.т/км<sup>2</sup>; 4 – 1-10 тыс. т/км<sup>2</sup>; 5 – 0,1-1 тыс. т/км<sup>2</sup>; 6 –неперспективные области орогенов и неглубокого (менее 0,5 км) залегания фундамента; 7 – очаговые области, обогащённые дисперсным органическим веществом при частичном или полном отсутствии ловушек УВ; 8 – месторождения УВ; 9 – перспективные структуры

#### 1.4.2 Оценка представительности разреза земной коры по интенсивности скоростных неоднородностей при фиксированных размерах куба осреднения

Для выявления скоростных (плотностных) неоднородностей, разрез земной коры по всей площади исследуемого региона от земной поверхности до границы М разбивался на равное количество интервалов, длина которых варьировала в зависимости от рельефа указанных границ. Пересечение криволинейных поверхностей с вертикальными плоскостями, параллельными границам рассматриваемого объёма геологической среды позволило создать пространственную модель распределения значений скорости, привязанных к узлам созданной объёмной регулярной криволинейной сети. Рассматривалось 3 варианта представления разреза в виде объёмной модели узловых точек, имеющей 30, 40 и 49 горизонтальных сечений. Выбор количества сечений определялся низкой степенью изменчивости скорости с глубиной и возможностями оперативной памяти компьютера.

Но в отличие от слоя, мощностью 20 км, расстояние между узловыми точками 3D модели земной коры в целом по вертикали варьировало:

- для 30-слойной модели – от 1000 до 2200 м;
- для 40-слойной модели – от 800 до 1650 м;
- для 49-слойной модели – от 650 до 1350 м.

С увеличением числа слоёв растёт степень приближения осреднённого и исходного полей распределений значений скорости, так как для выявления аномальных значений скорости, так же как и в предыдущем случае, использовался элементарный куб осреднения, содержащий по вертикали 20 точек. Соответственно, сгущение интервалов между точками повышает степень сглаживания и снижает интенсивность выделяемых аномалий скорости.

Оценка представительности разреза земной коры Прикаспийского региона по интенсивности пониженных значений скорости продольных волн показала, что с увеличением глубины разуплотнённость геологической среды возрастает, а оптимальным интервалом для её описания являются значения - (250 - 550) м/с (Рисунок 3).

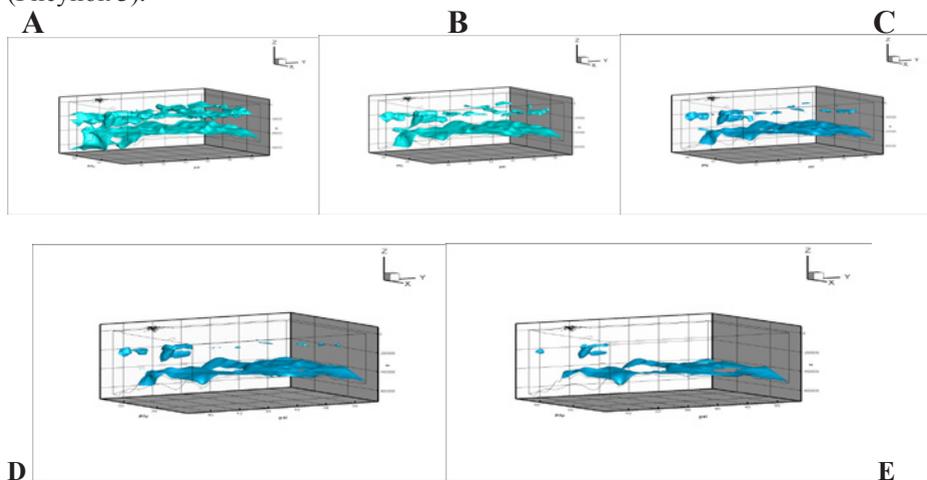


Рисунок 3. Распределение областей пониженных значений скорости в разрезе земной коры Прикаспийского региона. А- 250 м/с; В- 350 м/с; С- 400 м/с; D- 450 м/с; E- 550 м/с, количество горизонтальных сечений n=30

Как отмечалось, получение оптимального результата обусловлено физическими размерами куба осреднения, которые в свою очередь зависят от количества горизонтальных сечений (n). На рисунке 4 показан пример трансформации областей разуплотнения в зависимости от количества горизонтальных сечений (n). Из рисунка 4 следует, что с увеличением количества сечений области пониженных значений скорости сокращаются при неизменном сохранении подобия как по форме, так и по пространственной локализации. Последнее обстоятельство позволяет дифференцировать разрез по степени интенсивности выделяемых аномалий внутри выбранного набора сечений (n) и тем самым выявить наиболее устойчивые.

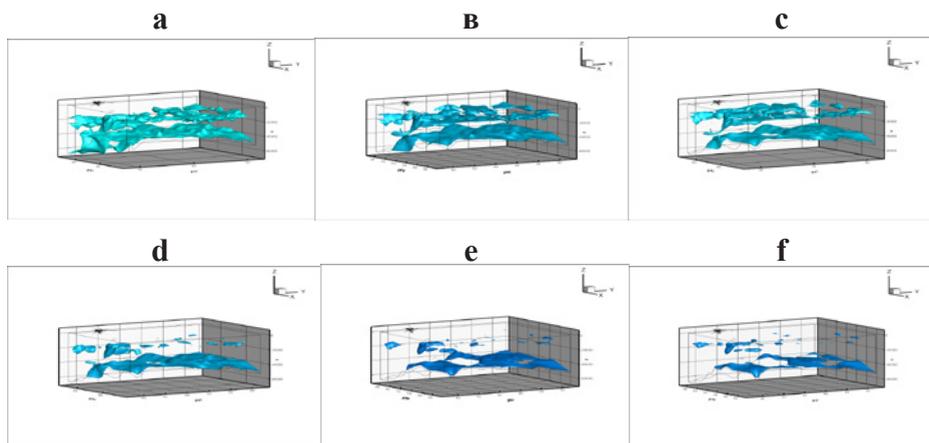


Рисунок 4. Распределение областей пониженных значений скорости в земной коре для различных окон осреднения: (-250 м/с) – А- n=30, В- n= 40, С- n=49, (-400 м/с) – D- n=30, Е- n= 40, F- n=49

Отсюда следует вывод, что выбор вертикального размера куба осреднения определяется вертикальным градиентом скорости, а также постановкой решаемой задачи.

### 1.3 Особенности локализации и морфологии областей разуплотнения в разрезе земной коры

В разрезе земной коры Каспийского региона выявлено два слоя пониженной скорости продольных сейсмических волн, имеющих чёткую пространственную локализацию. Первый слой хорошо проявляется в значениях – (250-350) м/с. Изоповерхность, соответствующая одному из этих значений показана на рисунке 5. По латерали он с различной степенью выразительности проявляется по всей территории исследуемого региона.

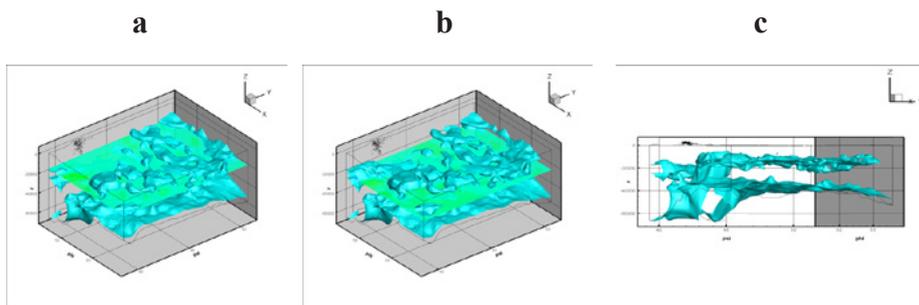


Рисунок 5. Изоповерхность значением – 250 м/с и разрез земной коры Каспийского региона/ А- срез на уровне -15 км, В- срез на уровне 20 км. Ось Y направлена на север

В пространственно-морфологическом плане он представляет собой рваную поверхность со сложным рельефом, локализирующуюся в диапазоне глубин  $15 \pm 5$  км, что отчётливо видно на фоне срезов, соответствующих глубинам 15 и 20 км. Несмотря на сложную конфигурацию в плане, очевидно, что все участки изоповерхности взаимосвязаны, а в южном секторе исследуемого региона она уходит в нижние горизонты коры, что даёт основание считать её связующим каналом с нижележащим волноводом (рисунок 5, С).

Второй слой пониженной скорости с преобладающими значениями – (400-500) м/с выделяется в интервале глубин  $40 \pm 7$  км. На рисунке 6 показана изоповерхность, значением – 450 м/с, из которого следует, что по площади она занимает не менее 2/3 территории Прикаспийского региона с преимущественным развитием на севере и юго-востоке. Эти две области соединены между собой широкой перемычкой. Поэтому в плане, можно считать, что слой образует сплошность переменной интенсивности с относительно плавно меняющимся рельефом. Причём, глубина его с юга на север возрастает, достигая отметок близких к 50 км (рисунок 6 В, С). А в южном секторе региона изоповерхность образует структуру, напоминающую воронку, западные края которой уходят в низы земной коры под структуры в плане соответствующие Кавказ-Копетдагскому орогену.

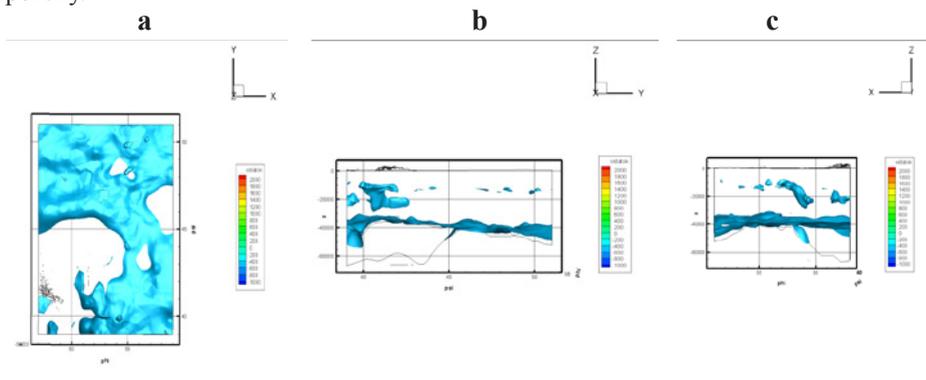


Рисунок 6. Изоповерхность значением – 450 м/с и разрезы земной коры Каспийского региона.

А- план, В- разрез в направлении С-Ю, С- разрез в направлении В-З. Ось Y направлена на север.

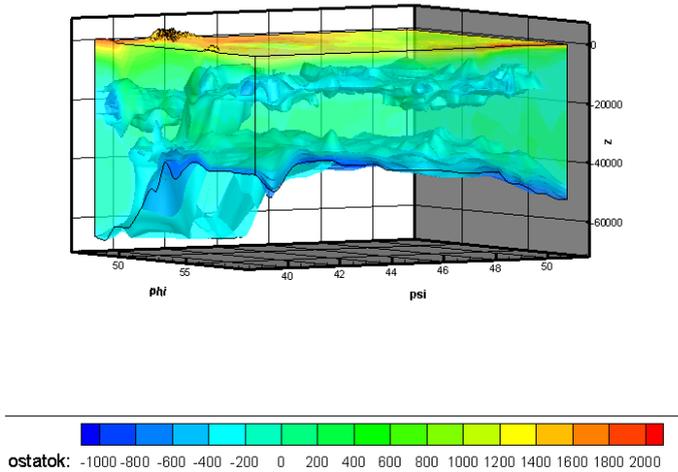
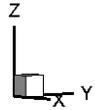


Рисунок 7. 3D модель разуплотнённого разреза земной коры Каспийского региона с выделенными изоповерхностями пониженных значений скорости сейсмических волн  $-250$ ;  $-400$ ;  $-550$  м/с.

Ось Y направлена на север.

Таким образом, земная кора Прикаспийского региона представляется сложно построенной структурой, в разрезе которой присутствуют слои пониженной скорости (рисунок 7), представляющие собой взаимосвязанные площадные образования, по-видимому, имеющие связь с верхней мантией. На этом основании можно предполагать, что земная кора Каспийского региона представляет собой систему разуплотнений, пронизывающих геологическую среду подобно системе кровеносных сосудов, обеспечивающих миграцию флюидов под воздействием внешних сил и сил внутренней конвекции.

### Список литературы

- [1] Багдасарова М.В. Системное изучение современной динамики и флюидодинамики в прогностических целях поисков флюидогенных месторождений полезных ископаемых.
- [2] Геодинамика и сейсмичность литосферы Каспийского региона. Алматы, 2008. С. 349.
- [3] Глумов И.Ф. Маловицкий .П., Новиков А.А. Сенин Б.В. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М., Недра, 2004. С. 343.

[4] *Дмитриевский А.Н., Каракин А.В., Баланюк И.Е.* Концепция флюидного режима в верхней коре (гипотеза корового волновода). // ДАН РАН.// М., –2004.– С. 15-32.

[5] *Каракин А.В.* Математическая модель корового волновода. // Российский журнал наук о Земле. Вып.3, № 4, Октябрь 2001. (Интернет-ресурс).

[6] *Киссин И.Г.* «Чувствительные зоны» земной коры и амплитуды аномалий – предвестников землетрясений. // ДАН СССР, 1985, т. 281, №2, с. 304 - 307.

[7] *Соколов Б.А., Старостин В.И.* Флюидодинамическая концепция формирования месторождений полезных ископаемых (металлических и углеводородных). // Смирновский сборник – 97. Основные проблемы рудообразования и металлогении. М., 1997.

## 1.5 АСЕЙСМИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ В ЗЕМНОЙ КОРЕ И ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*Жантаев Ж.Ш.<sup>1</sup>, Ким А.С.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>АО «Национальный центр космических исследований и технологий»,

<sup>2</sup>ДТОО «Институт ионосферы»

Показано, что асейсмические движения в земной коре перед землетрясениями и возникающие при этом перемещения диффузного проводящего слоя могут приводить к электрокинетическим явлениям и быть одной из причин локального изменения магнитного поля.

Медленные движения земной коры в зонах разломов – одно из важнейших проявлений тектонической жизни Земли. Исследования современных тектонических движений свидетельствуют о том, что геологический разлом представляет собой зону разупрочнения с аномально низкой эффективной вязкостью [1,2]. Разлом представляет собой зону со сложным внутренним строением, имеет характерные размеры – протяженность, преобладание длины над шириной. Зоны разломов характеризуются тем, что в них возможны развитые сдвиговые деформации, которые могут приводить к значительным смещениям берегов. Внутри разлома горные породы раздроблены и характеризуются повышенной трещиноватостью и пониженной прочностью, о чем свидетельствует характер распространения сейсмических волн на разломах и вне него. Ползучесть горной породы в зоне тектонического разлома приводит к такой ее деформации, которую можно рассматривать как асейсмическое течение ньютоновской вязкой жидкости [3]. Асейсмическое скольжение вдоль разломов вызывает перераспределение напряжений в приразломной зоне и может предшествовать разрушению [4-5].

Подготовка сильных землетрясений охватывает огромные объемы находящихся в напряженном состоянии внешних слоев Земли. В период подготовки землетрясений происходит растрескивание породы в очаговых зонах, облегчающее поступление в эти зоны насыщенных ионами флюидов, а непосредственно перед землетрясениями – локализация деформаций в узкие (десятки, сотни метров) по геологическим масштабам зоны. Деформирование и разрушение горных пород вызывают механоэлектрические процессы, которые приводят к разделению электрических зарядов в результате возникновения заряженных дислокаций на дефектах кристаллической решетки, образования электрически заряженных трещин, протекания электрохимических реакций на границах минеральных зерен, возникновения нескомпенсированных ионов [6-7]. Электрокинетические явления в зоне активизации асейсмических движений могут привести к увеличению электропроводности диффузионной зоны и уменьшению ее магнитной вязкости. Проведенные теоретические исследования показали, что асейсмические движения в консолидированной среде перед землетрясениями и возникающие при этом перемещения диффузного проводящего слоя могут приводить к заметным локальным изменениям магнитного поля.

Рассмотрим задачу о вариациях магнитного поля в земной коре, возникающих в результате активизации асейсмических движений, предвещающих разрушение породных массивов.

Уравнения движения механики сплошной среды с учетом электромагнитных сил имеют вид [8]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \operatorname{div} \hat{P} + \rho_e \vec{E} + \frac{1}{c} (\vec{j} \times \vec{H}), \quad (2)$$

$$\rho \frac{d}{dt} \left( \varepsilon + \frac{v^2}{2} \right) = -\operatorname{div} \vec{q} + \operatorname{div} (\hat{P} \times \vec{v}) + \vec{E} \cdot \vec{j}, \quad (3)$$

$\rho$  - плотность среды,  $\vec{v}$  - скорость,  $\hat{P}$  - тензор напряжений,  $\rho_e$  - плотность заряда,  $\vec{E}$  - напряженность электрического поля,  $\vec{H}$  - напряженность магнитного поля,  $\vec{j}$  - плотность тока,  $\rho\varepsilon$  - плотность внутренней энергии,  $\vec{q}$  - вектор потока тепла.

Электромагнитные величины связаны уравнениями Максвелла и законом Ома.

Уравнения магнитной гидродинамики, которые получены из общих уравнений при условии,  $\frac{v}{\sigma L} \ll 1$ , имеют вид [8]

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\operatorname{grad} p + \frac{1}{4\pi} \operatorname{rot} \vec{H} \times \vec{H} + \operatorname{div} \hat{t}, \quad (4)$$

$$\rho T \frac{ds}{dt} = -\operatorname{div} \vec{q} + \Phi + \frac{v_m}{4\pi} (\operatorname{rot} \vec{H})^2, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \operatorname{rot} (\vec{v} \times \vec{H}) - \operatorname{rot} (v_m \operatorname{rot} \vec{H}), \quad (6)$$

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0, \quad (7)$$

где

$$\operatorname{div} \hat{t} = \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} \vec{e}_i, \quad \Phi = \frac{1}{2} \tau_{ik} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right),$$

$$\tau_{ik} = \eta \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_m}{\partial x_m} \right) + \zeta \frac{\partial v_m}{\partial x_m} \delta_{ik},$$

$$\vec{q} = -k \cdot \operatorname{grad} T, \quad v_m = \frac{c^2}{4\pi\sigma},$$

$p$  – давление,  $\hat{\tau} = \tau_{ik}$  – тензор вязких напряжений,  $S$  – энтропия,  $\Phi$  – диссипативная функция,  $\eta$  и  $\zeta$  – первый и второй коэффициенты вязкости,  $T$  – температура,  $\nu_m$  – магнитная вязкость,  $c$  – скорость света,  $\sigma$  – проводимость среды.

Электрические величины выражаются через магнитные по формулам

$$\vec{E} = \frac{1}{c} [\nu_m \text{rot } \vec{H} - \vec{v} \times \vec{H}], \quad \rho_e = \frac{1}{4\pi} \text{div } \vec{E},$$

$$\vec{j} = \sigma \left( \vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v} \times \vec{H} \right) = \frac{c}{4\pi} \text{rot } \vec{H}, \quad T_{ij} = \frac{1}{4\pi} H_i H_j - \frac{\delta_{ij}}{8\pi} H^2,$$

$\hat{T} = T_{ij}$  – тензор напряжений электромагнитного поля.

В приближении магнитной гидродинамики электрическое поле напряжений не создает.

Уравнения вязкой электропроводной несжимаемой жидкости с прямолинейными линиями тока, параллельными оси  $x$ , когда  $\vec{v} = \vec{v}(y, z)$ ,  $\vec{H} = \vec{H}(y, z)$ , упрощаются и имеют вид

$$0 = -\frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{1}{4\pi} \left( H_y \frac{\partial H_x}{\partial y} + H_z \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) + \eta \Delta v_x, \quad (8)$$

$$0 = -\frac{\partial p^*}{\partial y} + \frac{1}{4\pi} \left( H_y \frac{\partial H_y}{\partial y} + H_z \frac{\partial H_y}{\partial z} \right), \quad (9)$$

$$0 = -\frac{\partial p^*}{\partial z} + \frac{1}{4\pi} \left( H_y \frac{\partial H_z}{\partial y} + H_z \frac{\partial H_z}{\partial z} \right), \quad (10)$$

$$H_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + H_z \frac{\partial v_x}{\partial z} + \nu_m \Delta H_x = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0, \quad (13)$$

$$v_y = 0, v_z = 0, p^* = p + \frac{H^2}{8\pi} \quad (14)$$

Рассмотрим движение вязкого проводящего слоя между двумя плоскостями при  $H_y = 0, \frac{\partial p}{\partial x} = 0$ . Уравнения (8)-(13) в этом случае принимают вид

$$\frac{1}{4\pi} H_z \frac{dH_x}{dz} + \eta \frac{d^2 v_x}{dz^2} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{dp}{dz} + \frac{1}{8\pi} \frac{d(H_x^2)}{dz} = 0 \quad (16)$$

$$H_z \frac{dv_x}{dz} + v_m \frac{d^2 H_x}{dz^2} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{d^2 H_z}{dz^2} = 0, \quad (18)$$

$$\frac{dH_z}{dz} = 0 \quad (19)$$

Граничные условия зададим в виде

$$v_x(-b) = -V_0, H_x(-b) = H_{x0}, H_z(-b) = H_{z0} \quad (20)$$

$$v_x(b) = V_0, H_x(b) = H_{x0}, H_z(b) = H_{z0}, p(V_0 = 0) = p_0 \quad (21)$$

Решение краевой задачи для вязкого проводящего слоя получим из уравнений

$$\frac{d^3 H_x}{dz^3} - \frac{H_{z0}^2}{4\pi\eta v_m} \frac{dH_x}{dz} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{dv_x}{dz} = \frac{v_m}{H_{z0}} \frac{d^2 H_x}{dz^2} \quad (23)$$

с учетом граничных условий (20)-(21) в виде

$$H_x(z) = H_{x0} - \sqrt{\frac{4\pi\eta}{v_m} \frac{ch(\kappa_0 b) - ch(\kappa_0 z)}{sh(\kappa_0 b)}} V_0, \quad (24)$$

$$\kappa_0 = \frac{H_{z0}}{\sqrt{4\pi\eta v_m}} \quad -b \leq z \leq b$$

$$H_z(z) = H_{z0}, \quad -b \leq z \leq b \quad (25)$$

$$v_x(z) = \frac{\operatorname{sh}(\kappa_0 z)}{\operatorname{sh}(\kappa_0 b)} V_0, \quad -b \leq z \leq b \quad (26)$$

Вариация магнитного поля имеет вид

$$\delta H = \delta H(z) = |H_x(z) - H_{x0}| = \sqrt{\frac{4\pi\eta}{v_m} \frac{c\hbar(\kappa_0 b) - c\hbar(\kappa_0 z)}{\operatorname{sh}(\kappa_0 b)}} V_0 \quad (27)$$

$$\delta H_{max} = \delta H(0) = \sqrt{\frac{4\pi\eta}{v_m} \frac{c\hbar(\kappa_0 b) - 1}{\operatorname{sh}(\kappa_0 b)}} V_0 \quad (28)$$

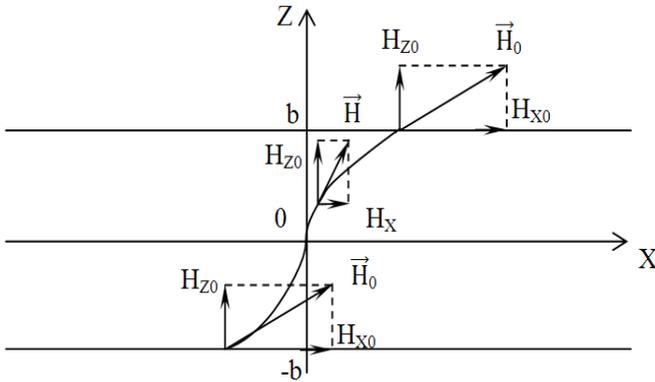


Рисунок 1 – Эюра вектора напряженности магнитного поля

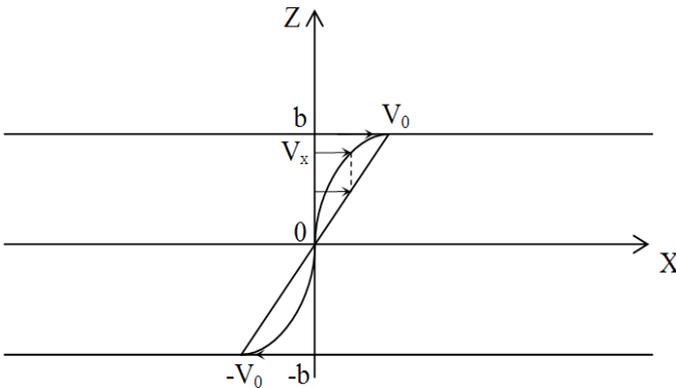


Рисунок 2 – Эюра  $x$ -компоненты скорости перемещений в асейсмической зоне

Для оценки вариации магнитного поля примем следующие параметры:

$$c = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см}}{c}, \quad b = 200 \text{ м} = 2 \cdot 10^4 \text{ см}, \quad H_{z0} = 50000 \text{ нТл},$$

$$\mu = 3 \cdot 10^{11} \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}, \quad q = 6 \cdot 10^8 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}, \quad \eta = 1,2 \cdot 10^{15} \frac{\text{дин} \cdot \text{сек}}{\text{см}^2},$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{q}{2\mu} = \frac{6 \cdot 10^8}{2 \cdot 3 \cdot 10^{11}} = 10^{-3}, \quad V_0 = 36 \frac{\text{см}}{\text{ч}} = 10^{-2} \frac{\text{см}}{\text{сек}},$$

$$\dot{a} = V_+ - V_- = 2V_0 = 2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{см}}{\text{сек}},$$

$$\eta_{eff} = \frac{\eta}{2b} = \frac{1,2 \cdot 10^{15}}{2 \cdot 2 \cdot 10^4} = 3 \cdot 10^{10} \text{ ед. СГС},$$

$$\tau_{zx} = \eta_{eff} \dot{a} = 3 \cdot 10^{10} \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 6 \cdot 10^8 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2},$$

$$\tau_{zx} = 2\mu\varepsilon_{xz} = 2 \cdot 3 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^8 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$$

$$\frac{H_{z0} b}{\sqrt{4\pi\eta v_m}} = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 10^4}{\sqrt{4\pi \cdot 1,2 \cdot 10^{15} \cdot 10^5}} \ll 1$$

$$\text{При } \frac{H_{z0} b}{\sqrt{4\pi\eta v_m}} \ll 1 \quad \delta H \cong \frac{H_{z0}}{v_m} \cdot \frac{b^2 - z^2}{2b} V_0, \quad \delta H_{max} = \frac{H_{z0}}{2v_m} b V_0$$

$$\text{При } v_m = 10^5 - 10^6 \text{ ед. СГС} \quad \delta H_{max} = 5 - 50 \text{ нТл}$$

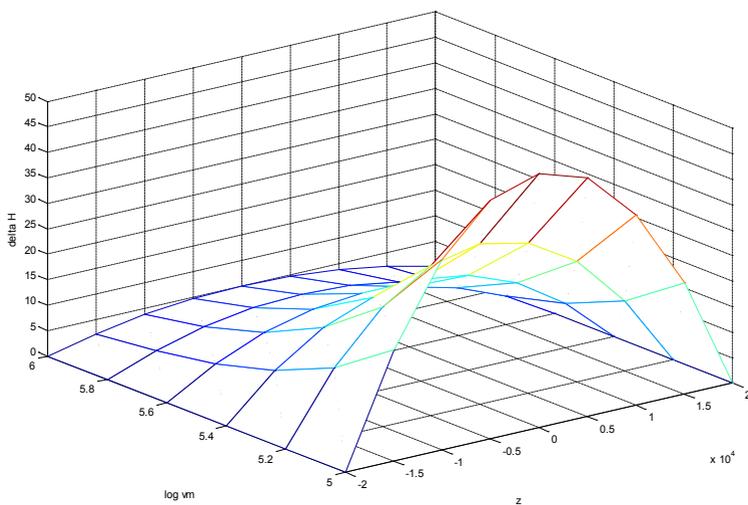


Рисунок 3 – Распределение вариации  $\delta H_x$  в асейсмической зоне в зависимости от магнитной вязкости материала асейсмической зоны

На рисунке 3 представлена зависимость величины вариации  $\delta H_x$  - компоненты магнитного поля в асейсмической зоне шириной 400м, когда магнитная вязкость, выраженная в логарифмических координатах, меняется от до единиц СГС.

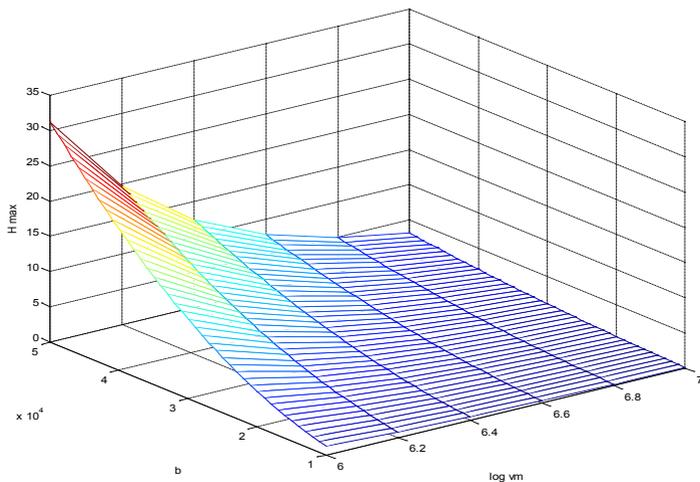


Рисунок 4 – Распределение максимальной величины вариации  $\delta H_{max}$  в зоне асейсмических движений в зависимости от ширины асейсмической зоны и величины магнитной вязкости

На рисунке 4 дано распределение максимальной величины вариации магнитного поля в асейсмической зоне в зависимости от ширины асейсмической зоны, меняющейся от 200 до 1000м, и величины магнитной вязкости, меняющейся от 0 до 35 единиц магнитной вязкости СГС.

Из полученных результатов следует, что асейсмические движения в земной коре, предвещающие землетрясения, могут вызывать заметные вариации основного магнитного поля, и синхронны с ними.

### **Список литературы**

[1] *Черепанов Г.П.* Об одном механизме развития разломов в твердой оболочке Земли // Известия АН СССР, Физика Земли. -1984, № 9. С. 3-12.

[2] *Адушкин В.В.* Актуальные проблемы геомеханики земной коры // Вестник ОГГГГН. - 2001, №1(16). С. 1 - 32.

[3] *Тёркот Д., Шуберт Дж.* Геодинамика. М.: Мир, 1985. - 731 с.

[4] *Моги К.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. - 282 с.

[5] *Ким А.С.* Асейсмическое скольжение вдоль разлома в породном массиве перед разрушением // Труды международной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». Новосибирск: ИГД СО РАН, 2004. – С. 141-144.

[6] *Ким А.С.* Асейсмические движения в зоне тектонического разлома и вариации магнитного поля // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, №4, ч.2, 2011. С. 457-458.

[7] *Соловьев С.П., Спивак А.А.* Электромагнитные сигналы в результате электрической поляризации при стесненном деформировании горных пород // Физика Земли. - 2009, № 4. С. 76-84.

[8] *Куликовский А.Г., Любимов Г.А.* Магнитная гидродинамика. М.: Логос, 2005. –328с.

## 1.6 МЕДЛЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ БЛОКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ЗОНЕ ВЯЗКОУПРУГОГО РАЗЛОМА

*Ким А.С.<sup>1</sup>, Шпади Ю.Р.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ДТОО «Институт ионосферы»

<sup>2</sup>ДТОО «Институт космической техники и технологий»

Исследование эволюции нестационарных процессов в зонах тектонических разломов имеет важное значение в динамике литосферно - ионосферных взаимодействий, для расчета медленных вертикальных и горизонтальных движений земной поверхности, при изучении динамики блочных структур и разломов, которые являются мощными источниками возмущений, контролирующими миграцию сейсмическую активности, фильтрацию флюидов, разрушение горных пород [1-4].

Разлом, представляющий собой зону со сложным внутренним строением, имеет характерные размеры – протяженность, преобладание длины над шириной. Внутри разлома горные породы раздроблены и характеризуются повышенной трещиноватостью и пониженной прочностью, о чем свидетельствует характер распространения сейсмических волн на разломах и вне него. Исследования современных тектонических движений свидетельствуют о том, что геологический разлом представляет собой зону разупрочнения с аномально низкой эффективной вязкостью. Разлом проявляет свои упругие свойства при быстром нагружении и ведет себя как вязкая жидкость под действием постоянных или медленно меняющихся напряжений.

Исследуем задачу геомеханики о движении протяженных блоков, имеющих разные упругие характеристики и размеры, в условиях ползучести на смежной вязкоупругой границе и в вязком подстилающем слое. Используя вязкоупругую модель разломной зоны [3], поставим начально-краевую задачу и методами интегральных преобразований получим аналитическое решение задачи в изображениях.

Рассмотрим два смежных упругих протяженных блока толщиной  $h_L$  с поперечными размерами  $D_1$  и  $D_2$ , движущиеся друг относительно друга на ньютоновском вязком подстилающем слое под действием сдвигающих напряжений  $\tau_x = q$  на торцах блоков.

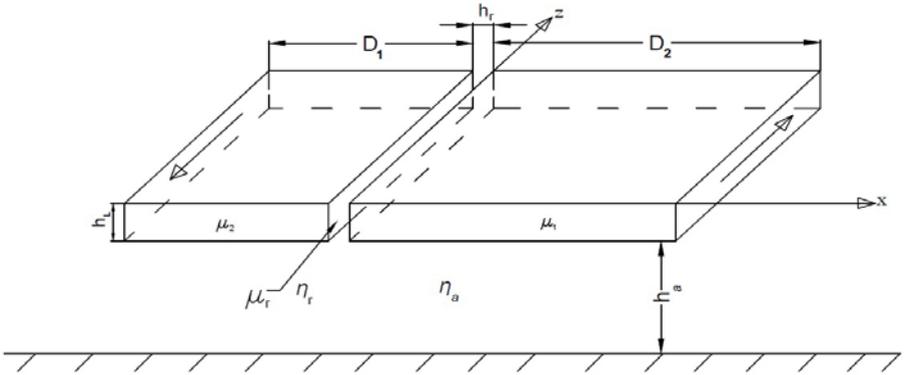


Рисунок 1. Схема движения протяженных взаимодействующих блоков на вязком основании.

Предположим, что в основании подстилающего слоя скорость равна нулю, а сдвиговое течение в астеносфере можно аппроксимировать линейным течением Куэтта.

Тогда перемещения  $w_1$  и  $w_2$  в протяженных блоках удовлетворяют уравнению диффузии

$$\frac{\partial w_1}{\partial t} = \kappa_1^2 \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2}, x > 0, \kappa_1 = \sqrt{\frac{h_a h_L \mu_1}{\eta_a}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = \kappa_2^2 \frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2}, x < 0, \kappa_2 = \sqrt{\frac{h_a h_L \mu_2}{\eta_a}} \quad (2)$$

где  $\eta_a$  - вязкость подстилающего слоя,  $h_a$  - толщина подстилающего слоя,  $\mu_1$  и  $\mu_2$  - модули сдвига протяженных блоков,  $\eta_r$  - вязкость на разломе,  $\mu_r$  - модуль сдвига на разломе.

Предположим, что для медленных движений в зоне смежной границы материал находится в условиях диффузионной или компрессионной ползучести, а реакция материала на быстрые нагрузки является упругой. Тогда смежную границу можно представить вязкоупругим слоем толщиной  $h_r$ , внутри которого выполняется условие

$$\frac{ad}{td} = \frac{1}{\mu_3} \frac{d\tau}{td} + \frac{1}{\eta} \tau, \quad (3)$$

где  $\eta$  - эффективная вязкость,  $\mu_3$  - эффективный модуль сдвига на смежной разломной границе, отнесенный к ширине разлома;  $a$  - взаимное смещение берегов разлома:

$$a = w_+ - w_-, \quad (4)$$

$$w_+ = w^1(h_r / 2; t), \quad w_- = w^2(-h_r / 2; t) \quad (5)$$

Напряжения  $\tau_{xyz}^1$  и  $\tau_{xyz}^2$  связаны с перемещениями  $w_1$  и  $w_2$  формулами

$$\tau_{xyz}^1 = \mu_1 \partial w_1 / \partial x, \quad h_r / 2 < x < D_1 \quad (6)$$

$$\tau_{xyz}^2 = \mu_2 \partial w_2 / \partial x, \quad -D_2 < x < -h_r / 2 \quad (7)$$

Предположим, что на концах плит при  $x = D_1$  и  $x = -D_2$  приложены касательные напряжения

$$\tau_{xyz}^1 = q, x = D_1 \quad (8)$$

$$\tau_{xyz}^2 = q, x = -D_2 \quad (9)$$

В начальный момент плиты находятся в однородном напряженном состоянии

$$\tau_{xyz}^1 = q, \tau_{xyz}^2 = q \quad (10)$$

с перемещениями

$$w_1 = xq / \mu_1, \quad \text{при } t = 0, \quad x > h_r / 2; \quad (11)$$

$$w_2 = xq / \mu_2, \quad \text{при } t = 0, \quad x < -h_r / 2 \quad (12)$$

В дальнейшем толщиной разлома пренебрежем, т.е.  $h_r \rightarrow 0$ , а задачу решаем в эффективных модулях.

Суперпозицией вида

$$w_1 = \hat{w}_1 + xq / \mu_1, x > 0; \quad (13)$$

$$w_2 = \hat{w}_2 + xq / \mu_2, x < 0 \quad (14)$$

перейдем от рассматриваемой задачи для  $w_1$  и  $w_2$  к приведенной для  $\hat{w}_1$  и  $\hat{w}_2$ .

Ниже исследуем приведенную задачу, крышечку над символами опустим. Заметим, что для приведенной и исходной задач скорости перемещений в блоках и скачки смещений на разрыве совпадают.

Применив к уравнениям (1)-(2) преобразование Лапласа, учитывая начальные и граничные условия на разломе и торцах блоков, получим общее решение для перемещений приведенной задачи в изображениях

$$w_1(x, p) = \frac{q}{p} \frac{a_{22} - a_{12}}{a_1 a_{22} - a_{12} a_{12}} \left( \exp \frac{(2D_1 - x)\sqrt{p}}{\kappa_1} + \exp \frac{x\sqrt{p}}{\kappa_1} \right), \quad x > 0 \quad (15)$$

$$w_2(x, p) = \frac{q}{p} \frac{a_{11} - a_{12}}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{12}} \left( \exp \frac{-x\sqrt{p}}{\kappa_2} + \exp \frac{(2D_2 + x)\sqrt{p}}{\kappa_2} \right), \quad x < 0 \quad (16)$$

где

$$a_1 = \left[ \left( 1 + \frac{\eta}{\mu} p \right) \mu_1 \frac{\sqrt{p}}{\kappa_1} + \eta p \right] \exp \frac{2D_1 \sqrt{p}}{\kappa_1} + \eta p - \mu_1 \frac{\sqrt{p}}{\kappa_1} \left( 1 + \frac{\eta}{\mu} p \right) \quad (17)$$

$$a_{12} = -\eta p \left( 1 + \exp \frac{2D_2 \sqrt{p}}{\kappa_2} \right) \quad (18)$$

$$a_{21} = \eta p \left( 1 + \exp \frac{2D_1 \sqrt{p}}{\kappa_1} \right) \quad (19)$$

$$a_{22} = \mu_2 \frac{\sqrt{p}}{\kappa_2} \left( 1 + \frac{\eta}{\mu} p \right) - \eta p - \left[ \mu_2 \frac{\sqrt{p}}{\kappa_2} \left( 1 + \frac{\eta}{\mu} p \right) + \eta p \right] \exp \frac{2D_2 \sqrt{p}}{\kappa_2} \quad (20)$$

Формулы (15) и (16) дают перемещения в изображениях для блоков разных поперечных размеров и модулей сдвига со смежной вязкоупругой разломной зоной на вязком основании.

На рисунке 2 представлены смещения в блоках (метры) в зависимости от времени (года) и расстояния до смежной границы (километры).

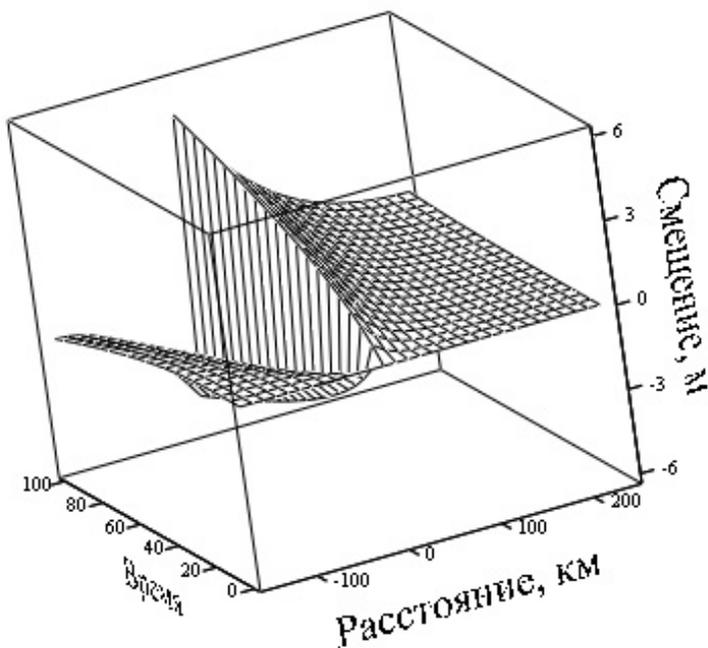


Рисунок 2. Смещения в блоках на промежутке времени от 0 до 100 лет при вязкости материала на разломе

Численные расчеты проведены при следующих значениях параметров:

$$D_1=240000 \text{ м}, D_2=150000 \text{ м}, \mu_1=3 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2, \mu_2=3.5 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2,$$

$$h_a=100000 \text{ м}, \eta_a=4 \cdot 10^{19} \text{ Па} \cdot \text{с}, q=2 \cdot 10^6 \text{ Па}, h_r=100 \text{ м}, \mu_2=2 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$$

Из результатов численного анализа следует, что возникшие на разломе тектонические возмущения через некоторое время достигают соседних блоков. На оси расстояний промежутку от -150 до 0 соответствует левый блок, а промежутку от 0 до 240 км - правый блок. В тестовом варианте, представленном на рисунке 2, когда вязкость материала разломной зоны  $\eta_r = 10^{16} \text{ Па} \cdot \text{с}$ , примерно через 30 лет возмущения достигают границы левого блока, что может вызвать миграцию тектонической активности на соседний блок, расположенный на расстоянии 150 км.

На рисунке 3 представлены взаимные смещения берегов разлома в зависимости от времени и вязкости материала разломной зоны.

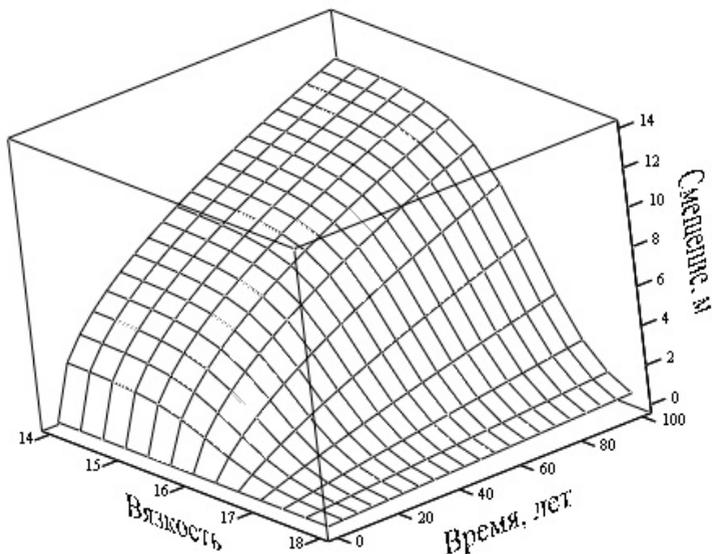


Рисунок 3. Взаимные смещения берегов разлома в зависимости от времени и вязкости в разломной зоне. Вязкость на рисунке дана в логарифмических координатах,  $\eta$  меняется от  $10^{14}$  до  $10^{18}$  Па·с

Проведенный численный анализ показал, что разломная вязкость оказывает существенное влияние на величину перемещений в блоках и скорость миграции возмущений на границы блоков. На рисунке 3 представлен результат численного анализа на промежутке времени от 0 до 100 лет. Из рисунка 3 следует, что при значениях разломной вязкости  $10^{17}$  Па·с и выше взаимные смещения на разломе примерно пропорциональны времени, что объясняется значительно большей величиной эффективной вязкости на разломе в сравнении с величиной эффективной вязкости подстилающего астеносферного слоя, когда движение блоков контролируется взаимодействием блоков на смежной границе. При значениях вязкости материала внутри разлома менее  $10^{15}$  Па·с эпюра смещений близка к боковой параболе, что объясняется тем, что движение блоков в этом случае контролируется вязкой реакцией астеносферного слоя.

Численный анализ показал, что с возрастанием вязкости материала разломной зоны уменьшаются смещения и скорость миграции возмущений в блоках. При значениях разломной вязкости и выше движение блоков контролируется взаимодействием блоков на смежной границе. При значениях вязкости на разломе менее движение блоков контролируется вязкой реакцией астеносферного слоя.

На рисунке 4 показаны перемещения, которые будут достигнуты в блоках через 60 лет в зависимости от расстояния до смежной границы и вязкости

материала разломной зоны, вязкость дана в логарифмических координатах,  $\eta_r$  меняется от  $10^{14} \text{Па}\cdot\text{с}$  до  $10^{18} \text{Па}\cdot\text{с}$

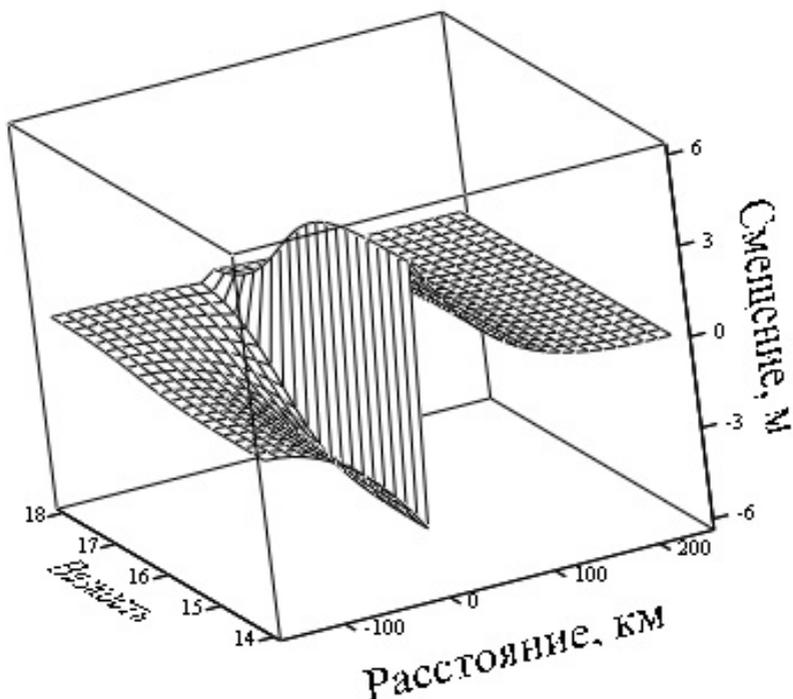


Рисунок 4. Перемещения в блоках через 60 лет в зависимости от расстояния, вязкости материала разломной зоны.

**Выводы.** Получено аналитическое решение задачи в изображениях для движущихся на вязком основании смежных блоков с разными поперечными размерами и упругими модулями и вязкоупругой контактной зоной. Определены перемещения в блоках и взаимная подвижка бортов разлома в зависимости от жесткости блоков земной коры и вязкости заполняющего разлом материала. Установлено, что возмущения, возникшие на смежной границе, через некоторое время достигают границ блоков, что может вызвать миграцию тектонической активности на соседний блок. В тестовом варианте возникшие на разломе тектонические возмущения достигают через 30 лет границы блока, что может вызвать миграцию тектонической активности на соседний блок, расположенный на расстоянии 150 км.

### **Список литературы**

[1] *Теркот Д., Шуберт Дж.* Геодинамика. – М.: Мир, 1985. - 731с.

[2] *Айтиалиев Ш.М., Баймухаметов А.А., Ким А.С.* Об эволюции напряжений на границе литосферных плит в условиях поперечного сдвига // Доклады НАН РК. – 2007. -№ 3. –с. 35-38.

[3] *Ким А.С.* Медленные движения земной коры и концентрация напряжений в зоне вязкоупругого разлома/ Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. – С. 282-287.

[4] *Ким А.С.* Асейсмические движения в зоне тектонического разлома и вариации магнитного поля //Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. -2011. - №4.-С. 457-458.

## Раздел 2. Исследование динамических процессов атмосферы и солнечно-земных связей на основе наземно-космических измерений

### 2.1 ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОПАСНЫХ ПОВЫШЕНИЙ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В 2012 г.

*Крякунова О.Н., Цепакина И.Л., Николаевский Н.Ф., Малимбаев А.М.*

ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ»

Солнечные протонные события связаны с приходом в околоземное космическое пространство солнечных энергичных частиц. Во время этих событий повышается уровень радиационной опасности для космонавтов, экипажей и пассажиров высотных самолетов на полярных трассах; повышение уровня радиационной обстановки приводит к потерям спутников и выходу из строя научной и навигационной аппаратуры на космических объектах.

Наземные возрастания солнечных космических лучей составляют часть протонных (и не только протонных) возрастаний, наблюдаемых у Земли на меньших энергиях. Характеристики наземных возрастаний космических лучей (GLE) хорошо коррелирует с характеристиками протонных событий, регистрируемых спутниковой аппаратурой, особенно самыми высокоэнергичными её каналами. Похожим образом проявляется связь высокоэнергичных спутниковых возрастаний и GLE с солнечными источниками. Не видно никаких оснований, чтобы предлагать для объяснения наземных событий какие-то особые механизмы ускорения или какие-то необычные условия, качественно отличающие ускорительные процессы в этих событиях от обычной работы солнечного ускорителя. Существенные отличия, разумеется, присутствуют, но они имеют количественный характер и обусловлены, в основном, тем, что наземные возрастания – это самые высокоэнергичные из возрастаний солнечных космических лучей.

В 2012 г. наблюдались следующие протонные события (ПС), приведенные в таблице 1.

N п/п	Начало события	Окончание события	Энергии >10 МэВ	Энергии >100 МэВ	Источник	Примечание
1	23 января	Не успело закончиться, добавилось новое ПС.	>10	>100	Вспышка M8.7 в АО 11402	Для >100 МэВ оконч. 28.01.2012
2	27 января	1 февраля	>10	>100	Вспышка X1.7 в АО 11402	Для >100 МэВ оконч. 28.01.2012
3	25 февраля	27 февраля	> 10	—	Вспышечное событие за западным лимбом	
4	5 марта	Не успело закончиться, добавилось новое ПС.	>10	—	DSF в центре диска	

5	7 марта	Не успело закончиться, добавилось новое ПС.	>10	>100	Вспышки класса X в АО 11429 и АО 11430	Для >100 МэВ оконч. 11.03.2012
6	13 марта	18 марта	>10	>100	Вспышка класса М7.9 в АО 11429	Для >100 МэВ оконч. 14.03.2012
7	17 мая	21 мая	>10	>100	Вспышка класса М5.1 в АО 11476	Для >100 МэВ оконч. 19.05.2012
8	27 мая	29 мая	>10	–	АО 11482 за лимбом	Очень маленькое
9	16 июня	17 июня	>10	–	Залимбовый источник	Очень маленькое
10	8 июля	10 июля	>10	–	Вспышка класса М6.9 из АО 1515	Очень маленькое
11	12 июля	Не успело закончиться, добавилось новое ПС.	>10	>100	Вспышка класса X1.4 из АО 1520	Для >100 МэВ оконч. 15.07.2012
12	17 июля	Не успело закончиться, добавилось новое ПС.	>10	>100	Вспышка класса М1.7 из АО 1520	Для >100 МэВ оконч. 17.07.2012
13	19 июля	Не успело закончиться, добавилось новое ПС.	>10	>100	Вспышка класса М7.7 из АО 1520	Для >100 МэВ оконч. 21.07.2012
14	23 июля	6 августа	>10	>100	Залимбовый источник	Для >100 МэВ оконч. 26.07.2012
15	1 сентября	4 сентября	>10	–	Залимбовый источник	
16	8 сентября	9 сентября	>10	–	Залимбовый источник	Очень слабое
17	24 сентября	27 сентября	>10	–	Залимбовый источник	Очень слабое
18	28 сентября	1 октября	>10	>100	DSF на западе диска	Для >100 МэВ оконч. 29.09.2012

Таблица 1. Протонные возрастания, зарегистрированные в 2012 году

Весь 2012 г. соответствует периоду интенсивного роста солнечной активности 24 цикла. В соответствии с имеющимися статистическими данными, такие периоды характеризуются увеличением количества активных областей, солнечных вспышек, эрупций волокон, ростом амплитуды радио- и рентгеновского излучения и др. В то же время в этот период уменьшается количество корональных дыр. В настоящее время все эти закономерности наблюдаются.

Вспышечная активность в 2012 г. оставалась, в основном, на среднем и низком уровне, ежедневно регистрировалось от 1 до 11 вспышек класса В и С. Всего в 2012 г. с января по 15 октября зарегистрировано 111 вспышек класса М и 6 вспышек класса X. За этот же период в 2011 г. было зарегистрировано 97 вспышек класса М и 8 вспышек класса X.

Значительное повышение потока протонов было зафиксировано 26 ноября. Особенностью этого события было то, что его источником служил волоконный выброс плазмы. Поток протонов низкой энергии (до 10 МэВ) быстро стабилизировался, а более высокоэнергичные частицы не показали значительного

роста. Магнитосфера Земли слабо отреагировала на пришедшее возмущение, среднесуточный Ар-индекс был равен 10.

Кроме того, с января по март 2012 г. было зарегистрировано 25 солнечных вспышек класса М и 4 вспышки класса Х. По данным спутника GOES зафиксировано 6 протонных возрастаний, причем в четырех отмечены частицы с энергиями  $> 100$  МэВ. 27 января активная область 11402 стала источником самого крупного за последние несколько месяцев всплеска солнечной активности. В ночь с 27 на 28 января здесь произошла крупная солнечная вспышка класса X1.7. Всплеск от этой вспышки мгновенно вызвал сильное радио-затемнение на низких широтах, которое вскоре перешло к незначительному R1 шторму по шкале «NOAA». Уже по первоначальным данным было ясно, что выброс не направлен к Земле. Тем не менее, 27 января началось большое протонное возрастание для частиц с энергиями  $> 100$  МэВ (11.9 pfu.), поток частиц с энергиями  $> 10$  МэВ достиг 800 pfu. Для частиц с энергиями  $> 100$  МэВ, событие закончилось на следующий день, 28 января. Для частиц с энергиями  $> 10$  МэВ событие оказалось достаточно продолжительным по времени и закончилось 1 февраля.

В начале марта 2012 г., после месячного затишья, наблюдался новый крупный всплеск активности Солнца, источником которого стала активная область (АО) 11429 (N18L299, Sp=1270 м.д.п.). Область оказалась крупнейшей в новом цикле по энерговыделению и суммарной площади пятен. Появление таких мощных областей обычно сопровождается крупными взрывными событиями. Это связано с тем, что солнечные пятна развиваются там, где на поверхности Солнца всплывают мощные магнитные потоки. Магнитные потоки приносят с собой значительную энергию, которая сбрасывается в виде вспышек и выбросов плазмы. Со 2 по 8 марта область произвела 38 солнечных вспышек и три крупных выброса вещества. Всего за этот период зарегистрировано 25 вспышек класса С, 11 вспышек класса М и 2 класса Х, причем обе вспышки высокого класса произошли в один день 7 марта. (X5. и X1.3). Пик активности области пришелся на 6-7 марта. В результате в ночь с 4 на 5 марта началось небольшое протонное возрастание для частиц с энергиями  $> 10$  МэВ (2pfu). Не успело оно закончиться, как 7 марта добавилось новое протонное возрастание, оказавшееся самым крупным в 24 солнечном цикле (рисунок 1, [http://www.swpc.noaa.gov/rt\\_plots/pro\\_3d.html](http://www.swpc.noaa.gov/rt_plots/pro_3d.html)). 9 марта потоки протонов с энергиями  $> 10$  МэВ достигли 6000 pfu, с энергиями  $> 100$  МэВ – 70 pfu. 10 марта поток протонов ослабевает. 11 марта поток протонов с энергиями  $> 10$  МэВ составляет 35 pfu. 12 марта поток протонов с энергиями  $> 100$  МэВ закончился. Не успело это событие закончиться, как 13 марта началось новое протонное возрастание от вспышки класса M7.9, произошедшей в той же активной области 11429. Потоки протонов с энергиями  $> 10$  МэВ достигли 500 pfu, с энергиями  $> 100$  МэВ – 2 pfu, 14 марта потоки протонов с энергиями  $> 10$  МэВ снизились до 100 pfu, с энергиями  $> 100$  МэВ до 0,3 pfu. 14 марта поток протонов с энергиями  $> 100$  МэВ закончился. Потоки протонов с энергиями  $> 10$  МэВ перешли к фоновому состоянию 18 марта.

С середины марта до мая 2012 г. радиационная обстановка в околоземном пространстве оставалась относительно благоприятной. Следующее значительное

протонное возрастание зарегистрировано 17 мая после вспышки класса M5.1 из активной области 11476, произошедшей на западном лимбе (рисунок 2). Выброс коронарного вещества почти не задел магнитосферу Земли. На третий день среднесуточный Ар-индекс составил 11. Тем не менее, на Земле началось большое протонное возрастание. Потоки протонов с энергиями > 10 МэВ достигли 300pfu, с энергиями > 100 МэВ – 20pfu. На следующий день потоки стали ослабевать. 19 мая возрастание для частиц с энергиями > 100 МэВ закончилось. 21 мая возрастание закончилось и для частиц с энергиями > 10 МэВ. Особенностью этого события стало то, что впервые в новом 24 цикле солнечной активности потоки заряженных частиц были зарегистрированы не только на околоземных орбитах, но и всеми высокоширотными станциями на поверхности Земли. После перерыва в 6 лет с момента последнего GLE 13 декабря 2006 г. было зарегистрировано наземное возрастание солнечных космических лучей (GLE71).

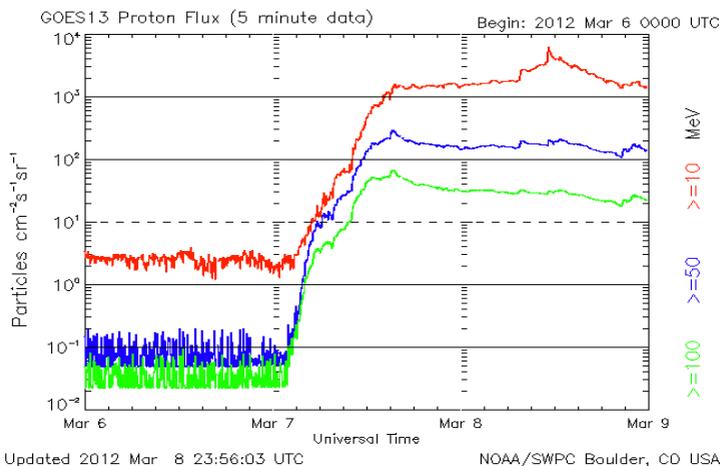


Рисунок 1. Возрастание протонов 7-9 марта 2012 г.

С середины марта до мая 2012 г. радиационная обстановка в околоземном пространстве оставалась относительно благоприятной. Следующее значительное протонное возрастание зарегистрировано 17 мая после вспышки класса M5.1 из активной области 11476, произошедшей на западном лимбе (рисунок 2). Выброс коронарного вещества почти не задел магнитосферу Земли. На третий день среднесуточный Ар-индекс составил 11. Тем не менее, на Земле началось большое протонное возрастание. Потоки протонов с энергиями > 10 МэВ достигли 300pfu, с энергиями > 100 МэВ – 20pfu. На следующий день потоки стали ослабевать. 19 мая возрастание для частиц с энергиями > 100 МэВ закончилось. 21 мая возрастание закончилось и для частиц с энергиями > 10 МэВ. Особенностью этого события стало то, что впервые в новом 24 цикле солнечной активности потоки заряженных частиц были зарегистрированы не только на околоземных орбитах, но и всеми высокоширотными станциями на поверхности Земли. После перерыва в 6 лет с момента последнего GLE 13 декабря 2006 г. было зарегистрировано наземное

возрастание солнечных космических лучей (GLE71).

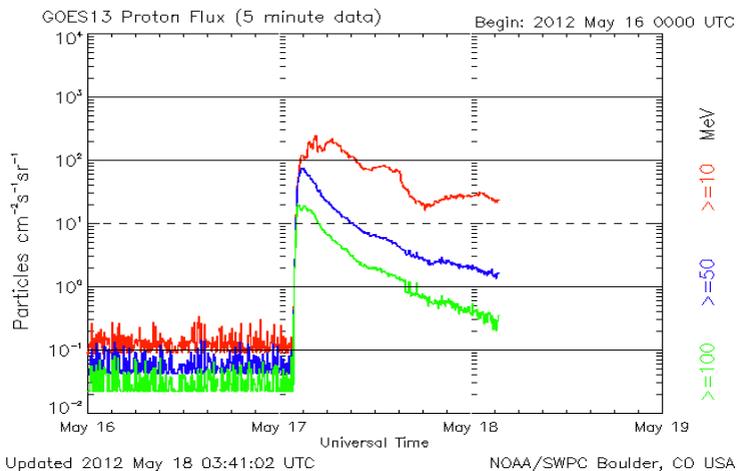


Рисунок 2. Возрастание протонов 7-9 марта 2012 г.

На рисунке 3 приведены данные 33 нейтронных мониторов мировой сети станций, данные которых доступны в реальном времени на странице европейской базы данных ([www.nmdb.eu](http://www.nmdb.eu)), куда отправляются каждую минуту в реальном времени и данные высокогорной станции космических лучей ДТОО «Институт ионосферы». Четко прослеживается начало возрастания солнечных космических лучей с разницей в 2-3 минуты в 01:55 по мировому времени. Начало вспышки зарегистрировано в 01:25, а ее максимум в 01:47, т.е. заряженные частицы достигли земной поверхности за 6-8 минут. Максимальное возрастание потока солнечных космических лучей на высоких широтах составляла около 15 % на станции Южный Полюс, нейтронные мониторы станций низких широт протонных возрастаний не зарегистрировали.

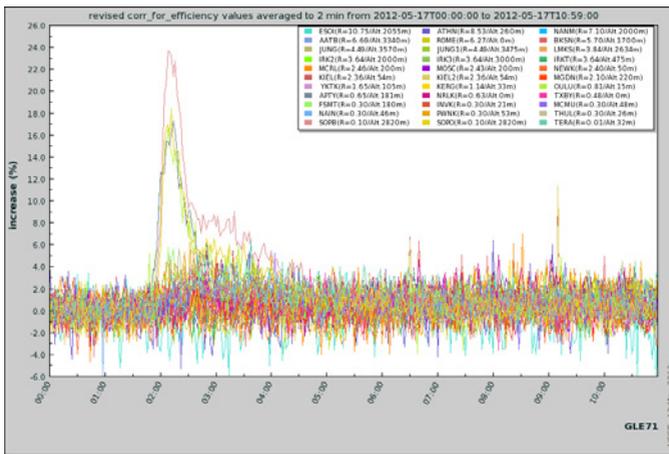


Рисунок 3. Данные нейтронных мониторов мировой сети станций за 17 мая 2012 г.

Описанные выше протонные события оказались самыми мощными в наступившем 24 солнечном цикле. В результате их воздействия в околоземном пространстве сохранялась неблагоприятная радиационная обстановка.

Нами было создано программное обеспечение для включения данных высокоширотной финской станции «Оулу» по измерению потока космических лучей с жесткостью геомагнитного обрезания 0,81 ГВ в казахстанскую гелиогеофизическую интегрированную базу данных, позволяющее ежеминутно контролировать уровень радиационной обстановки на средних и высоких широтах во время возможных протонных возрастаний в режиме реального времени. Это программное обеспечение позволило создать расширенную систему радиационного мониторинга околоземного пространства с выборкой и представлением на странице сайта гелиогеофизических обсерваторий ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ» данных высокоширотной станции «Оулу» и среднеширотной станции космических лучей «Алма-Ата» в графическом и текстовом виде. Расширенная система позволяет регистрировать и анализировать в реальном времени повышения радиационной обстановки в космическом пространстве, которые могут не проявиться на наземных станциях космических лучей средних широт.

На рисунке 4 представлены данные станции Оулу (малиновый цвет) и станции Алма-Ата (зеленый цвет), передающиеся в ДТОО «Институт ионосферы» в режиме реального времени с 1-минутным разрешением. Видно, что приход частиц солнечного происхождения 17 мая 2012 г. был зарегистрирован только на высоких широтах. На средних широтах из-за большой жесткости геомагнитного обрезания (6,7 ГВ) наземное возрастание зарегистрировано не было.

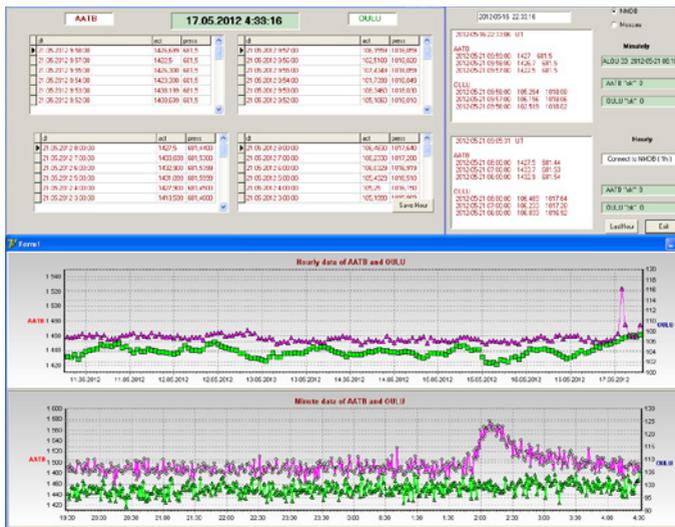


Рисунок 4. Наземное возрастание GLE71 17 мая 2012 г., зарегистрированное системой радиационного мониторинга ДТОО «Институт ионосферы»

Самым продолжительным в новом 24 цикле стало протонное возрастание, начавшееся вечером 12 июля от вспышки X1.4 из АО 1520, достигшее 90 rfu для протонов с энергиями > 10 МэВ и 0.2 rfu для протонов с энергиями > 100 МэВ. Максимальной величины протоны с энергиями > 10 МэВ достигли 12 июля – 96 rfu. Для протонов с энергиями > 100 МэВ событие закончилось 15 июля. Протоны с энергиями > 10 МэВ не успели вернуться к фоновому состоянию, как вечером 17 июля от вспышки класса M1.7 из АО 1520 началось следующее протонное возрастание, развившееся до радиационной бури 2-го класса. Поток протонов с энергиями > 10 МэВ достигли 130 rfu, с энергиями > 100 МэВ – 0,1 rfu. 18 июля для протонов с энергиями > 100 МэВ событие закончилось. Для протонов с энергиями > 10 МэВ событие продолжалось на уровне радиационной бури 1 класса (> 10 МэВ-25 rfu). Этот поток протонов также не успел вернуться к спокойному состоянию, как 19 июля добавилось еще одно протонное возрастание, вызванное вспышкой класса M7.7 из той же АО 1520, достигшее 90 rfu для протонов с энергиями > 10 МэВ и 0.2 rfu для протонов с энергиями > 100 МэВ. 21 июля событие для протонов с энергиями > 100 МэВ закончилось. Поток протонов с энергиями > 10 МэВ составил 8 rfu. 23 июля к этим событиям добавилось еще одно протонное возрастание от далекого залимбового источника. Оно достигло уровня радиационной бури 1 класса (для протонов с энергиями > 10 МэВ – 12 rfu, для протонов с энергиями > 100 МэВ – 0,7 rfu). 26 июля событие для протонов с энергиями > 100 МэВ закончилось. Для частиц с энергиями > 10 МэВ событие продолжалось на уровне 10 rfu. 30 августа поток протонов оставался на том же уровне. 31 июля и 1 августа потоки протонов с энергиями > 10 МэВ зарегистрированы на уровне 0,8 rfu, затем амплитуда постепенно уменьшалась до 0,2 rfu. Закончилось это длительное возрастание

малой амплитуды 6 августа. Таким образом, для потока протонов с энергиями  $> 10$  МэВ событие продолжалось с 12 июля по 6 августа. Это протонное возрастание соответствовало периоду повышенной вспышечной и пятнообразовательной активности Солнца и стало самым продолжительным в новом 24 солнечном цикле. В результате его воздействия в околоземном пространстве какое-то время сохранялась неблагоприятная радиационная обстановка.

Кроме этого длительного протонного возрастания, зарегистрированы еще несколько незначительных возрастаний для частиц с энергией  $> 10$  МэВ: 18 мая, 27 мая, 8 июля, 1 сентября, 8 сентября и 24 сентября. Потoki протонов были связаны с солнечными вспышками класса С и М, в основном, из залимбовых источников и продолжались не более двух суток. Наиболее значительное событие началось в ночь с 27 на 28 сентября и было связано с быстрым выбросом солнечного волокна в западной части диска. Для протонов с энергиями  $> 10$  МэВ возрастание составило 30 pfu, для протонов с энергиями  $> 100$  МэВ – 0,1 pfu. 29 сентября для протонов с энергиями  $> 100$  МэВ событие закончилось, для протонов с энергиями  $> 10$  МэВ продолжалось до 30 сентября (рисунок 5).

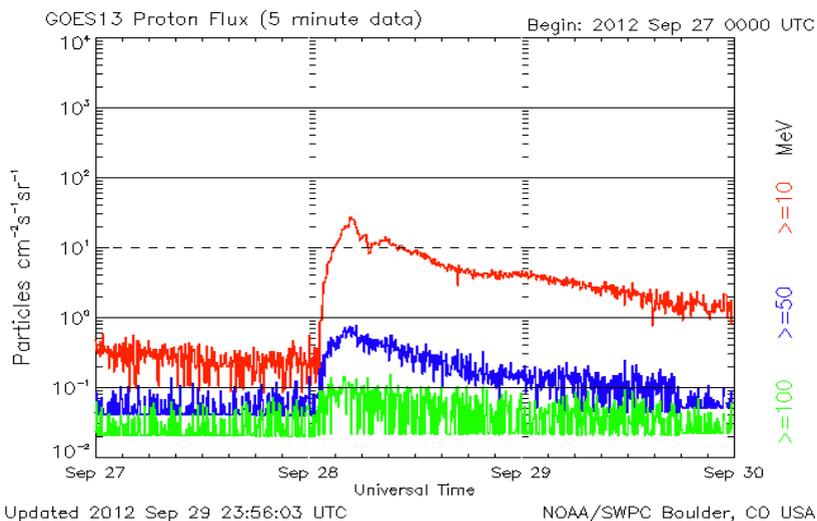


Рисунок 5. Протонное событие 28 сентября 2012 г.

Новый солнечный цикл является менее мощным, чем предшествующие 23, 22 и 21 циклы. По характеру своего развития он похож на 15 и 16 циклы. Если его развитие дальше пойдет так же, как в этих циклах, то максимум будет продолжительным и небольшой амплитуды. Тем не менее, по мере роста солнечной активности, будут регистрироваться солнечные вспышки, вызывающие возрастание заряженных частиц у поверхности Земли и в околоземном пространстве. В результате изучения этих событий будет получен уникальный материал для изучения процессов ускорения частиц и их солнечных источников, влияющих на радиационную обстановку в околоземном пространстве

## 2.2 ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ВАРИАЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ВЫСОКОГОРНОЙ УСТАНОВКЕ «ELIS-TS»

*Антонова В.П., Крюков С.В., Луценко В.Ю.*

ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ»

### 2.2.1 Введение

Мировая сеть регулярных наблюдений за атмосферным электричеством была создана во второй половине прошедшего столетия в период Международного геофизического года (1958 г). В нее вошли станции на территории США, Бельгии, Германии, Венгрии, Японии, Португалии, Канады и СССР. В Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО) были разработаны методические указания по наблюдениям за электрическим полем [1].

Обнаруженные аномальные эффекты в суточных вариациях напряженности электрического поля накануне землетрясений стимулировали в сейсмически активных регионах мира (Япония, Китай, Россия) интенсивное изучение динамических характеристик электрического поля для использования их особенностей в прогнозе землетрясений [2-7]. Исследования результатов регистрации электрического поля Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН на Камчатке, на станциях Владимирского государственного университета и на оз. Байкал показали, что регистрируемые перед землетрясениями аномалии атмосферного электрического поля по форме можно разделить на два основных типа [8]. Аномалии первого типа характеризуются резким спадом уровня электрического поля вплоть до смены знака за несколько часов до землетрясения (бухтообразная отрицательная форма), а второго - форму пакета колебаний с некоторым набором частот (сейсмогравитационные колебания). Наиболее вероятные значения бухт понижения напряженности поля составляют величины минус (100÷300) В/м, а длительности этих аномалий ~ 1-2 ч. [9-14]. На Камчатке, как наиболее сейсмоактивном регионе России, наблюдения с целью прогноза землетрясений были начаты в 1991 г. и продолжаются в настоящее время. В отличие от ранее проводимых экспериментов, современные наблюдения выполняются в комплексе с регистрацией многих геофизических параметров (ионосферных, геомагнитных, ОНЧ – излучения, концентрации радона, метеопараметров), непосредственно и опосредованно связанных с динамическими характеристиками электрического поля.

В Казахстане регулярные измерения атмосферного электрического поля стали проводиться с 2007 года. В рамках Государственной программы «Развитие космической деятельности в Республике Казахстан на 2005-2007 годы» на высокогорной станции ДТОО «Институт ионосферы» (высота 3340 м над уровнем моря) в сейсмически активном районе был установлен аппаратный комплекс «Elis-TS» по измерению атмосферных электрических полей [15]. Он предназначался для исследования динамических процессов в грозовой атмосфере,

их связи с космическими лучами, а также для решения других актуальных задач современной геофизики включая прогноз землетрясений. Поскольку Алматы окружен рядом потенциальных источников сильных землетрясений, эта проблема всегда была и будет актуальной для города и его окрестностей. Расположение установки вблизи разлома земной коры позволяет эффективно использовать измерения для проведения исследований в этом направлении.

Цель данной работы является исследование временных характеристик квазистатического электрического поля в периоды активизации сейсмических процессов в окрестности г.Алматы и выявление предвестников землетрясений.

### **2.2.2 Экспериментальный комплекс**

Комплексная система регистрации атмосферного электрического поля «ELIS-TS» состоит из двух датчиков. Один датчик чувствителен к высокочастотной переменной компоненте электрического поля, возникающей в грозовой атмосфере во время возвратного молниевых удара («return stroke»), а другой - к медленной квазистатической компоненте  $E_z$  (вертикальная составляющая поля). Для задачи выявления предвестников землетрясений используется главным образом второй датчик, измеряющий квазистатическое электрическое поле. По принципу действия - это электростатический флюксометр (антенна «field mill» - вертушка). В датчике используется принцип периодической экранировки измерительных электродов вращающимся заземленным диском с вырезами. Электрическая схема состоит из входных повторителей с высоким входным сопротивлением, синхронного детектора, на опорный канал которого поступает сигнал с фотодатчика положения диска, фильтра низких частот, выходного буферного усилителя и цепей защиты от перенапряжения и пробоя активных элементов.

Конструктивно антенное устройство помещено в водонепроницаемый корпус, предназначенный для установки «пластинами вниз» с целью ослабления влияния осадков на работу прибора. Прибор обеспечивает измерение электрического поля в диапазоне  $\pm 50$  кВ/м, при этом его выходное напряжение меняется в пределах  $\pm 5$ В. При 14 – разрядном АЦП это соответствует разрешению в 10 В/м., достаточному для регистрации известных из научной литературы аномалий поля перед землетрясениями. Частота дискретизации - 20 Гц. Временное разрешение равно 0.05 с в медленном режиме записи. В состав системы входит блок аналоговой обработки и пороговое устройство, вырабатывающее сигнал перевода компьютера в быстрый режим регистрации, соответствующий грозовым условиям. Антенный блок «field mill» регулярно калибруется помещением его в большой плоскопараллельный конденсатор с размерами  $(1,5 \cdot 1,5)$  м<sup>2</sup> на который подается фиксированное калибровочное напряжение.

По своим техническим характеристикам комплексная установка Института ионосферы АО «НЦКИТ» по измерению электрического поля не уступает мировым аналогам. Для исследования вариаций литосферного происхождения установка была дополнена блоком, позволяющим усиливать слабые флуктуации в 30-40 раз, и включена в непрерывный круглогодичный режим регистрации с просмотром базовых данных электрического поля в реальном времени на

удаленных компьютерах.

**2.2.3 Особенности вариаций электрического поля в разных метеорологических условиях.** Известно, что на регистрируемые вариации приземного электрического поля сильно влияют осадки в виде дождя и снегопада, туман, гроза, которые могут маскировать возмущения литосферного происхождения. Поэтому изучение вариаций электрического поля в разных метеорологических условиях, включая условия «хорошей погоды», являлось необходимым этапом для того, чтобы идентифицировать источники возмущений и выделять на их фоне изменения, обусловленные активизацией сейсмических процессов.

#### **2.2.4 Условия «хорошей погоды»**

Напряженность электрического поля у поверхности Земли практически постоянна вдоль её поверхности, весьма незначительно меняется во времени и составляет (при выполнении условий «хорошей погоды») 120 - 150 В/м над океаном и 75 - 125 В/м над материками. Общепринято, что условия «хорошей погоды» определяются метеоусловиями, соответствующими следующим критериям: отсутствие грозы и всякого рода осадков, инея, тумана, измороси, сильной и умеренной дымки (видимость более 4 км), нижней облачности, верхняя облачность не более 0,3 неба, скорость ветра не более 6 м/с. С точки зрения электродинамики аэроэлектрических процессов условия хорошей погоды соответствуют отсутствию в атмосфере процессов генерации зарядов, электрические процессы устойчиво проявляются, так что принципы квазистатики могут быть использованы [8]. Такие условия на высокогорной станции соблюдаются гораздо чаще с сентября по апрель и значительно реже летом.

На особенности суточной вариации квазистатического электрического поля в приземном слое атмосферы на станциях с разными географическими координатами, высотой над уровнем моря, рельефом места наблюдения помимо глобальных процессов (максимум грозовой активности на земном шаре) влияют и локальные: турбулентность, конвекция, наличие аэрозолей, повышенная радиоактивность в сейсмоактивных регионах, которая влияет на проводимость [16]. Все перечисленные локальные факторы, влияющие на измерения электрического поля и его характеристики, имеют место на Тянь-Шаньской высокогорной станции.

Для исследования суточной вариации в работе использовались данные измерений вертикальной составляющей квазистатического электрического поля с временным разрешением 0,05 с. Данные усреднялись на интервале 5мин. Длина реализации равняется 27 часам.

На рисунке 1 представлены графики с характерным суточным ходом значений электрического поля на высокогорной станции для разных сезонов. Главная особенность суточного хода – отсутствие унитарной вариации (кривая Карнеги), которое обусловлено расположением станции в глубине материка. Унитарная вариация не обнаружена ни на одной реализации на всем периоде измерений электрического поля на станции (2005-2009)гг двумя установками. Высокогорное

расположение станции в данном случае не является условием ее выделения, как утверждается в [17].

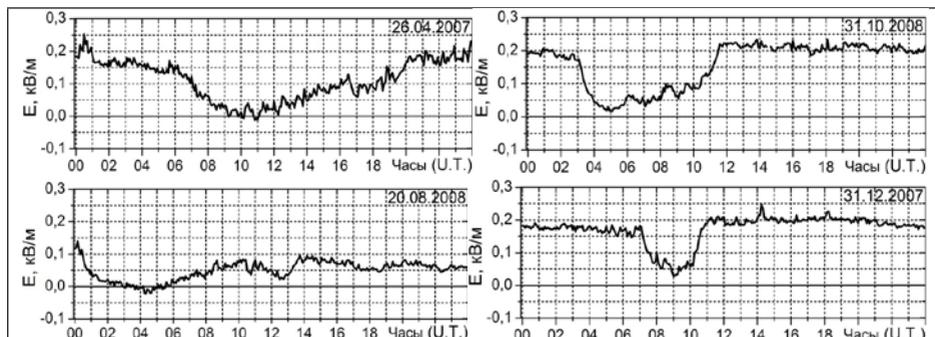


Рисунок 1 – Суточная вариация электрического поля на высокогорной Тянь-Шаньской станции в условиях хорошей погоды в разные сезоны: весна, лето, осень, зима

Другим характерным свойством суточной вариации квазистатического электрического поля на высокогорной станции в условиях хорошей погоды является наличие бухтообразного понижения  $E_z$  в освещенное время суток, рис. 1. Глубина бухты  $\sim 100\div 200$  В/м. Прослеживается явная сезонная зависимость ширины (длительности) бухты. Зимой, в период зимнего солнцестояния, длительность бухты минимальна и составляет 3-4 часа. Осенью длительность бухты больше,  $\sim 9$  часов. В период летнего солнцестояния она растянута на еще более длительный период.

Среднее значение электрического поля в зимний период значительно выше, чем в летний на 150-200 В/м. Подъем средних значений электрического поля по времени совпадает с наличием снежного покрова на станции. Одним из ионизирующих агентов приземной атмосферы является радон. Зимой поступление радона в атмосферу может быть частично или полностью блокировано смерзанием почвы и снежно-ледовым покровом (настом), вследствие чего уменьшается проводимость атмосферы и увеличивается величина напряженности электрического поля. Эти наблюдения совпадают с наблюдениями на других станциях, но повышенный фоновый уровень на Тянь-Шаньской станции регистрируется здесь значительно дольше, поскольку условия, вызывающие его увеличение сохраняются здесь в течение  $\sim 9$  месяцев в году.

Наличие минимума в суточном ходе напряженности электрического поля, по-видимому, наоборот связано с увеличением проводимости во время испарительного процесса в освещенное время суток. Зимой этот период значительно короче, чем в другие сезоны, что мы и наблюдаем в сезонном изменении длительности бухтообразного уменьшения напряженности поля.

### 2.2.5 Грозовые условия

Во время грозы значения напряженности электрического поля достигают громадных значений и несопоставимы с полем в условиях хорошей погоды. Поэтому грозовая активность является принципиальным препятствием для поиска предвестников землетрясений в этом геофизическом параметре. Однако, вызываемые грозой вариации квазистатического электрического поля легко идентифицируются и ее длительность не столь велика. На высокогорной станции она имеет место, главным образом, в летние месяцы. Записи вариаций квазистатического электрического поля (синяя линия) и его высокочастотной составляющей (зеленые линии), фиксирующей молниевой разряд (return stroke), в грозовых условиях представлены на рисунке 2.

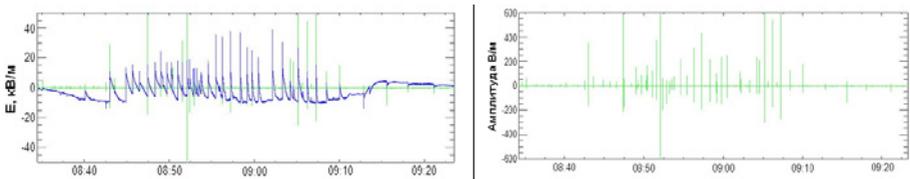


Рисунок 2 - Записи квазистатического электрического поля и его высокочастотной составляющей (левая панель), правая панель – только высокочастотная составляющая поля

### 2.2.6 Снегопад

Рассмотрим особенности вариаций квазистатического электрического поля на высокогорной Тянь-Шаньской станции во время снегопада. На рисунке 3а представлены регистрируемые значения электрического поля во время снегопада с сильным ветром (метель). Скорость ветра, по данным метеорологов, в этот период составляла 13-15 м/с. Регистрируемые вариации поля имеют линейчатую структуру в виде положительных кратковременными всплесков, достигающих значений 30 кВ/м. Высокое временное разрешение регистрации электрического поля позволяет увидеть тонкую структуру всплесков и определить их длительность, которая  $\leq 1$ с, рисунок 3а'.

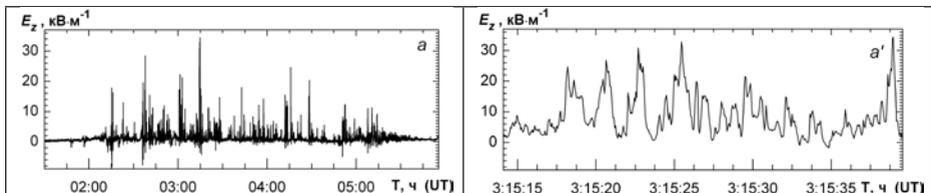


Рисунок 3 – Флуктуации электрического поля во время метели с разным временным разрешением

Наблюдаемая структура флуктуаций электрического поля во время метели обусловлена тем, что снежинки сильно электризуются, и датчик показывает

локальное значение поля, определяемое пролетающими мимо регистрирующих пластин зарядами, на фоне среднего поля облака. Снежинка, имеющая потенциал в 100 В и более, пролетая в 1 см от пластин, дает поле в несколько кВ/м. Небольшая длительность всплеска поля связана с быстрым пролетом снежинок мимо датчика и зависит от скорости ветра. Так при скорости ветра 15 м/с прибор длиной 15 см снежинка пролетает за 10 мс. Регистрируемые флуктуации атмосферного электрического поля в данном случае являются ложными.

### 2.2.7 Дождь, «мокрый» снег

Вариации приземного электрического поля, регистрируемые установкой «ELIS-TS», во время дождя могут достигать значений  $\pm 7\div 8$  кВ/м, рисунок 4 (левая панель).

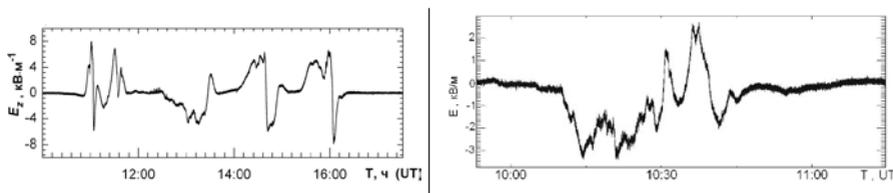


Рисунок 4 – Флуктуации электрического поля во время дождя (левая панель) и мокрого снегопада (правая панель)

По визуальным наблюдениям в течение периода, представленного на рисунке, над станцией отмечалась низкая облачность, морозящий дождь, штиль, грозы не было. Возмущения поля сохраняются в течение всего периода выпадения осадков. Переход от одной полярности электрического поля к другой довольно быстрый (от нескольких секунд до 10-15 мин) и отличается от изменений приземного электрического поля при прохождении электрически заряженного облака без выпадения осадков. Поскольку заряд облака быстро изменяться не может, то импульсы вызываются явлениями, происходящими вблизи прибора, в частности, пролетом заряженных капель или групп капель, как и в случае снегопада.

Во время «мокрого» снегопада (температура приземного воздуха выше нуля, но снежинки не успевают полностью растаять) на высокогорной станции весной, летом или осенью вариации электрического поля могут иметь как положительные значения, так и отрицательные, рисунок 5 (правая панель). Временное распределение значений электрического поля в этот период незначительно отличается от распределения во время дождя.

### 2.2.8 Туман

С целью идентификации возмущений приземного электрического поля, обусловленных туманом, по данным регистрации погодных условий на высокогорной станции были выбраны периоды с низким плотным туманом. Фактически эти метеоусловия соответствуют опусканию облачности до уровня

станции и ниже (уровень Большого Алма-Атинского озера). На рисунке 5 представлены записи электрического поля близкие по времени во время хорошей погоды 23.03.2010 г и во время тумана 18.03.2010 г. Видно, что средние значения напряженности электрического поля во время тумана значительно меньше, чем в условиях хорошей погоды на  $\sim 70$  В/м.

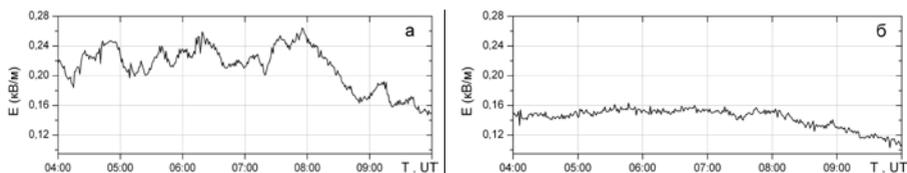


Рисунок 5 – Флуктуации электрического поля: а - во время хорошей погоды, б - во время тумана

По мере конденсации пара увеличиваются концентрация и размер капель воды (или льда) в тумане, следствием этого является перенос заряда на малоподвижные капли и к изменению проводимости, что приводит к флуктуациям напряженности электрического поля.

### 2.2.9 Особенности временных характеристик электрического поля в периоды активизации сейсмических процессов в окрестности г.Алматы

Для исследования динамических характеристик квазистатического электрического поля с целью поиска краткосрочных предвестников землетрясений учитывался опыт их выявления и изучения, а также требования к аппаратурно-программному комплексу мониторинга на различных станциях в сейсмоактивных регионах мира. В каталог выборочных сейсмических событий были включены, главным образом, землетрясения в окрестности 140 км от г.Алматы за 2007-2011гг (годы работы установки «ELIS-TS» в непрерывном режиме мониторинга) интенсивностью  $\geq 3$  б. При формировании каталога использовалась информация, представленная в Интернете на сайте ИГИ НЯЦ РК (<http://www.kndc.kz>). Исследовалась динамика значений электрического поля за 1-3 суток накануне и сутки после землетрясения.

Как было представлено выше, наиболее эффективным геофизическим фактором, влияющим на вариации электрического поля, являются метеорологические условия. На основе наблюдений за погодой на высокогорной Тянь-Шаньской станции было составлено краткое описание метеоусловий для всех выбранных периодов для дальнейшего распознавания источников возмущений в динамических характеристиках поля. Все вариации квазистатического электрического поля на исследуемых временных периодах, вызванные источниками возмущений метеорологического происхождения, были идентифицированы и совпадали с наблюдениями за погодой. Однако нами были обнаружены вариации электрического поля, которые не идентифицировались ни с одним источником возмущений; ни метеорологического происхождения, ни космофизического. Они также не соответствовали наблюдениям за погодными условиями в эти периоды.

На рисунке 6 приведены записи квазистатического электрического поля (синяя линия) и его высокочастотной составляющей (зеленая линия) 1 и 2 мая 2011 года. Стрелкой отмечен момент главного толчка землетрясения.

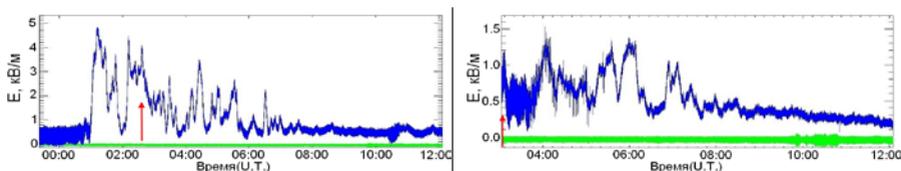


Рисунок 6 – Вариации приземного электрического поля и высокочастотной составляющей 1 мая 2011г. (левая) и 2 мая 2011 г. (правая).

Первого мая 2011 года значения поля достигают 5 кВ/м. Такие большие значения приземное электрическое поле имеет в грозовой атмосфере. Надежным идентификатором грозы является датчик высокочастотной составляющей квазистатического электрического поля, регистрирующий возвратный молниевой разряд (return stroke). Однако зеленая линия на левой и правой панелях, отражающая высокочастотную составляющую поля, без вертикальных всплесков, фиксирующих молниевые разряды как на рисунке 2.

Положительные значения датчик электрического поля регистрирует во время снегопада, но характер вариаций поля на рисунке 5 совершенно отличается от представленных флуктуаций поля на рисунке 3. По данным метеорологов на высокогорной Тянь-Шаньской станции 1 и 2 мая 2011 года наблюдалась хорошая погода. В этих условиях значения приземного электрического поля весной не превышают 200 В/м, рисунок 1. В рассматриваемые временные периоды значения поля на порядок выше, чем должны быть в условиях «хорошей погоды».

Поскольку 1 и 2 мая в Алматы и ее окрестностях регистрировалась серия землетрясений (Капчагайское землетрясение), нами сделан вывод, что аномальные положительные вариации квазистатического поля обусловлены источниками литосферного происхождения.

Первый, наиболее сильный толчок с магнитудой 5,4 был 1 мая в 2:31 UT (красная стрелка на рисунке 6). Резкий скачок электрического поля произошел за 1,5 часа до землетрясения. Аномальные положительные вариации электрического поля продолжались более 6 часов. Второго мая 2011 г увеличение электрического поля и начало аномальной положительной полярности вариаций электрического поля совпадает с началом землетрясения, что подтверждает вывод о литосферном происхождении источника возмущений и исключает случайность их возникновения. Длительность вариаций, как и 1 мая, более 6 часов.

По данным Казахстанского Национального центра за эти двое суток насчитывалось более 8 толчков от землетрясений с магнитудой  $\sim 4.0$  и более. Основной толчок с магнитудой 5,4 был 1 мая в 02:31 UT, 77.7 км к северо-востоку от Алматы, За 2,5 часа до него был зафиксирован слабый форшок с  $K=5.8$ . После землетрясения следовала серия аномально высоких афтершоков, как по

общему числу повторных толчков, так и по количеству сильных толчков с  $K \geq 9$ . Гипоцентр землетрясения расположен южнее Капчагайского водохранилища в Алматинской впадине на глубине 22 км и приурочен к узлу пересечения разломов высших порядков. Один из них субпараллелен Капчагай-Чиликскому сдвигу, другой имеет северо-восточное простирание (<http://www.kndc.kz>). Установка по измерению электрического поля расположена в зоне чувствительности к очагу этого землетрясения.

На рисунке 7 представлены минутные значения электрического поля за весь анализируемый период, с 28 апреля по 3 мая 2011. На панелях рисунков приведены краткие сведения о погодных условиях. Характерные вариации электрического поля для периодов с осадками в виде дождя или мокрого снега наблюдаются 28 апреля 2011г с 4-х до 5 часов и 29 апреля. Выпадение осадков в эти периоды подтверждаются сведениями высокогорной метеорологической станции ([www.tien-shan.org](http://www.tien-shan.org)). Красной линией отмечены аномальные значения электрического поля.

Чрезвычайно важным фактом является то, что длительные аномальные вариации положительной полярности регистрируются и накануне землетрясения; 28 и 30 апреля 2011 года, а также за 1.5 часа до главного толчка землетрясения. Характер изменений электрического поля в эти периоды подобен вариациям во время серии землетрясений 1 и 2 мая. Их продолжительность не менее 6 часов, а 30 апреля ~ 12 часов. Полное восстановление фоновых значений, типичных для условий «хорошей погоды» наблюдается 3 мая 2011 г (после землетрясений).

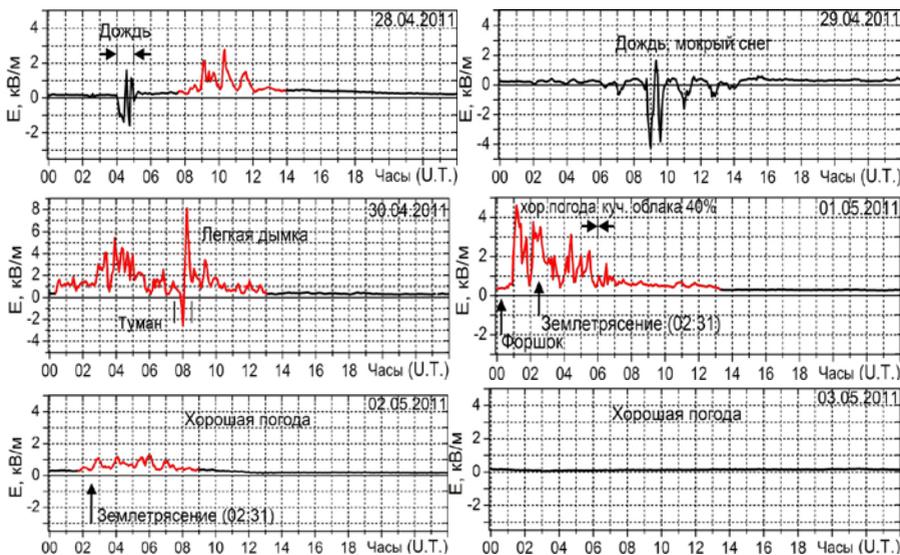


Рисунок 7 – Значения электрического поля накануне и во время серии землетрясений в окрестности г.Алматы 1-2 мая 2011 г.

Обратим внимание на особенности аномалий электрического поля 30 апреля (за сутки до землетрясения), которые можно разделить на два типа. Первый тип аномалий аналогичен характеру аномалий 28 апреля, 1 и 2 мая; продолжительные вариации электрического поля только положительной полярности. Во втором типе, помимо аномальных положительных значений электрического поля, наблюдаются и отрицательные значения. Аномальными являются необычно большие амплитуды положительных и отрицательных отклонений поля на фоне затухания положительных вариаций электрического поля. Изменения имеют биполярную форму импульса. Эти изменения поля зарегистрированы в условиях тумана со слабым ветром с 7ч 30мин до 8ч 30мин. В обычных условиях (сейсмически спокойных) подобный тип вариаций наблюдается во время дождя. Они являются ложными и обусловлены пролетом заряженных капель дождя мимо регистрирующих пластин детектора. Капли дождя приобретают заряд во время падения. Для мелких капель тумана, который наблюдался в течение 1 часа 30 апреля, необходим дополнительный источник ионизации, чтобы детектор зарегистрировал столь высокие значения. По-видимому, в рассматриваемый период ионизация приземной атмосферы была гораздо выше обычного фона за счет источника литосферного происхождения во время активизации сейсмических процессов (выход радиоактивных газов), что отразилось на результатах регистрации поля.

Аномальные вариации с особенностями временных характеристик подобными вариациям накануне и во время землетрясений 1 и 2 мая 2011 г обнаружены еще для двух слабых землетрясений, но с эпицентром в непосредственной близости от точки наблюдения поля (25 км). В первом случае - за 15 часов перед землетрясением 8 апреля 2009 года (магнитуда 3.6), рисунок 8, во втором случае – за 9 часов 27 сентября 2010 г. (магнитуда не более 3.3). Продолжительность аномалий также не менее 6 часов. Однако, в отличие от землетрясений 1 и 2 мая, они регистрировались только накануне землетрясений и не наблюдались во время землетрясения и после него.

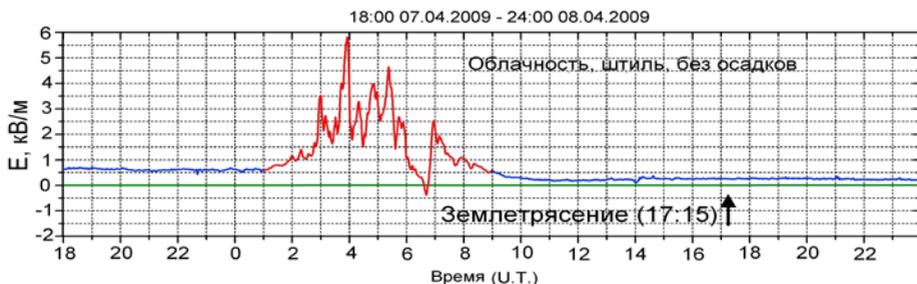


Рисунок 8 – Значения электрического поля накануне землетрясения в окрестности г. Алматы 8 апреля 2009 г.

Значительные аномальные изменения квазистатического электрического поля с амплитудой  $\sim \pm 2$  кВ/м зарегистрированы накануне землетрясения в Алматы 28 января 2013 года, рисунок 9. Согласно оперативным данным ЦСОССИ ИГИ НЯЦ РК землетрясение произошло в 16 часов 38 минут по Гринвичу в Алматинской области в 230 км. к востоку от г.Алматы. Координаты эпицентра: 42.64N, 79.76E. Энергетический класс=15.3. Глубина 10 км, магнитуда  $M_w=6.1$ . Землетрясение ощущалось в г.Алматы с интенсивностью 4-5 балла.

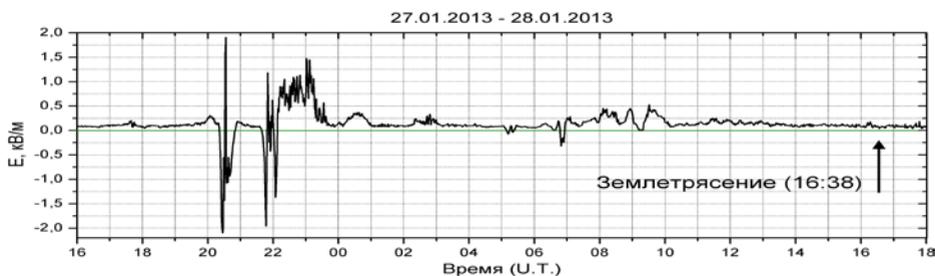


Рисунок 9 – Значения электрического поля накануне землетрясения в окрестности г.Алматы 8 апреля 2009г.

В этом событии мы наблюдаем два типа аномалий как и 30 апреля 2011 года. С 20.00 ÷ 22.15 7 апреля 2013 г. аномальные изменения подобны вариациям во время дождя, рисунок 4 (левая панель). Однако температура на высокогорной станции согласно измерениям метеорологов не превышала  $-10^0$  С. Осадков в виде дождя при такой температуре не могло быть. После 22ч.15мин наблюдаются только положительные аномальные изменения электрического поля.

### Заключение

Длительные аномальные изменения атмосферного квазистатического электрического поля на высокогорной станции ДТОО «Института ионосферы» АО «НЦКИТ» зарегистрированы накануне 2-х значительных землетрясений с магнитудой 5.4 и 6.1, а также перед 2-мя слабыми землетрясениями, но с эпицентрами, расположенными в непосредственной близости от установки. Аномальные изменения имеют большую амплитуду и не идентифицируются не только с геофизическими источниками возмущений, но и с космофизическими. Совпадение их с активизацией сейсмических процессов в регионе Северного Тянь-Шаня предполагает источник возмущений литосферного происхождения.

Мы полагаем, что квазистатическое электрическое поле является параметром полезным и необходимым для краткосрочного прогноза землетрясений в окрестности Алматы и исследования геофизических процессов их сопровождающих.

## Список литературы

- [1]. Руководящий документ РД 52.04.168-2001 Методические указания. Наблюдения за электрическим полем. С.-Петербург: Гидрометеонаиздат. 2002. 58 с.
- [2]. Электромагнитные предвестники землетрясений. Москва: Наука. 1982. 89 с.
- [3]. *Kondo G.* The variation of the atmospheric electric field at the time of earthquake // *Kakioka Magnet. Observ. Mem.* V. 13. №1. 1968. P. 11-23.
- [4]. *Enomoto Y., Tsutsumi A., Fujinawa Y. et al.* Candidate precursors: pulse-like geoelectric signals possibly related to recent seismic activity in Japan // *Geophys. J. Int.* V. 31. №3. 1997. P. 485-494.
- [5]. *Hao Jian-Guo, Tang Tian-Ming, Li De-Rui.* A kind of information on short-term and imminent earthquake precursors: - research on atmospheric electric field anomalies before earthquakes // *Acta Seismologica Sinica.* V. 11. №1. 1998. P. 121-131.
- [6]. *Руленко О.П.* Тензочувствительность предсейсмических отрицательных аномалий электрического поля в приземном воздухе // Сб. тр. Пятой Российской конф. по атмосфер. электричеству. Владимир: Изд-во Транзит ИКС. Т.2. 2003. С. 82-85.
- [7]. *Руленко О.П.* Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // *Вулканология и сейсмология.* №4. 2000 С. 57-68.
- [8]. *Бузевич А.В., Смирнов С.Э., Филимонов В.И., Фирстов П.Т.* Специализированный аппаратно-программный комплекс (АПК) сбора и обработки геофизической информации обс. Паратунка // Тез. докл. Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. 1998. С. 36-38.
- [9]. *Бузевич А.В., Дружин Г.И., Фирстов П.П., Вершинин Е.Ф., Смирнов С.Э., Филимонов В.И.* Гелиогеофизические эффекты, предварявшие Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997г. М=7.7 // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997г. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатской Гос. академии рыбопромыслового флота. 1998. С. 177-188.
- [10]. *Бузевич А.В., Смирнов С.Э.* Метод прогноза камчатских землетрясений по вариациям геомагнитного и атмосферного электрического полей Земли на фоне гелиомагнитосферных процессов // Сб. науч. тр. Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений. I Российско-Японский семинар. Хабаровск. 26-29 сентября 2000г. С. 179-186.
- [11]. *Vershinin E.F., Buzevich A.V., Yamoto K. et al.* Correlations of seismic activity with electromagnetic emissions and variations in Kamchatka Region // *Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes / Ed. M.Hayakawa.* Tokyo: Terra Scientific Publishing Company. 1999. P. 513-517.
- [12]. *Смирнов С.Э.* Особенности отрицательных аномалий квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // *Геомагнетизм и Аэрономия.* Т.45. №2. 2005. С. 282-287.
- [13]. *Грунская Л.В., Ефимов В.А., Исакевич В.В., Синютин А.С.* Взаимосвязь электрического поля приземного слоя с сейсмическими процессами // VI Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Нижний Новгород. 2007. С. 279-281.
- [14]. *Золотов А.Н., Петров А.Е., Синютин А.С.* Разработка каталога

электромагнитных предвестников землетрясений // VI Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Нижний Новгород. 2007. С. 281-282.

[15]. Антонова В.П., Дробжев В.И., Крюков С.В. Организация наземных экспериментов по регистрации квазистатического электрического поля (E) и высокочастотных флуктуаций  $dE/dt$  поля от молниевых разрядов // Казахстанские космические эксперименты. Алматы. 2007. С. 42-50.

[16]. *Смирнов С.Э.* Динамические характеристики вертикальной компоненты квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Москва: ИКИРР ДО РАН. 2007. 104 с.

[17]. *Алешков В.М., Коваленко В.А., Молодых С.И., Шаманский Ю.В.* Исследование атмосферного электричества на высокогорных станциях // Сб. тр. Шестой Российской конф. по атмосф. электричеству. Н-Новгород. 2007. С. 41-42

## 2.3 СТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОПАУЗЫ

*Ляхов В.В., Нецадим В.М., Акасов С. Б.*  
ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ»

### 2.3.1 Введение

Геомагнитные бури оказывают значительное влияние на различные аспекты жизнедеятельности человека. Первые исследования по теории геомагнитных бурь были проведены основоположниками современной геофизики Чепмэном и Ферраро еще в тридцатых годах прошлого столетия [1, 2].

Новый импульс исследования в этой области получили после осознания того факта, что Земля, как и другие планеты, погружены в расширяющуюся корону Солнца, названную солнечным ветром. Теория солнечного ветра была создана Паркером [3]. При обтекании потоком плазмы солнечного ветра магнитного поля Земли образуется магнитосфера, а в узкой области между плазмой и магнитным полем образуется пограничный слой, названный применительно к магнитосфере – магнитопаузой. Именно в магнитопаузе протекают определяющие процессы солнечно-земного взаимодействия, такие как пересоединение магнитных силовых линий солнечного ветра и магнитного поля Земли. Эти пересоединившиеся магнитные силовые линии сносятся солнечным ветром на ночную сторону, формируя магнитосферу Земли. Магнитопауза играет важнейшую роль и в магнитосферных бурях, обеспечивая поступление частиц плазмы солнечного ветра вдоль пересоединившихся силовых линий магнитного поля внутрь околоземного пространства.

Создание теории пограничного слоя встречает однако большие трудности математического характера [4], связанные, в частности, с некорректностью граничных условий (эти условия необходимо ставить на бесконечности).

В ряду других проблем теории переходного слоя наиболее важной является исследование процесса поляризации магнитоактивной плазмы переходного слоя. Так, спутниковые измерения в районе магнитопаузы свидетельствуют о наличии в этой области космического пространства стационарной и переменной компонент электрического поля. Переменную компоненту связывают с вариациями геомагнитного поля, а постоянную компоненту пытаются интерпретировать на основе явления поляризации магнитоактивной плазмы. Однако на сегодняшний день нет теории поляризации неоднородной магнитоактивной плазмы. Для того чтобы понять механизм возникновения стационарных электрических полей, обнаруженных в эксперименте, исследователи прибегают или к элементарным физическим оценкам, или к так называемому “квазинейтральному приближению” в описании магнитоактивной плазмы [5-7], суть которого состоит в использовании математического метода сингулярных возмущений. Однако, пользоваться этим методом необходимо с крайней осторожностью, поскольку результаты имеют очень приближенный характер даже в том случае, если исследователю удалось избежать расходящихся членов ряда.

В приближении квазинейтральности электрический потенциал не полагается

а priori равным нулю, но находится из условия равенства плотностей электронов и ионов:

$$n_e(A_y(z) \phi(z)) = n_i(A_y(z) \phi(z)).$$

Из этого соотношения можно выразить электрический потенциал через магнитный

$$\phi(z) = \phi(A_y(z))$$

и решить затем оставшееся уравнение для магнитного потенциала. Однако, это условие – тоже ограничение, накладываемое на плазму. Условие квазинейтральности хорошо выполняется при низких температурах и малых скоростях макроскопических потоков плазмы и хуже при высоких температурах и скоростях. В строгом смысле электронейтральное приближение является нулевым приближением метода сингулярных возмущений. Малым параметром для тепловой плазмы является отношение температуры электронов или ионов к энергии покоя соответственно электрона или иона. Нахождение следующего, уточняющего, первого приближения технически невозможно. Так, нельзя сделать никакого вывода о возможности пространственного разделения точек отражения компонент плазмы, определяемых методом квазинейтральности в нулевом приближении.

В истории изучения структуры неоднородных конфигураций магнитоактивной плазмы предпринимались попытки исследования эффекта поляризации в полной мере, вне границ приближения квазинейтральности [8, 9]. Так, Шабанским В.П. [8] было показано, что с увеличением скорости налетающего на магнитную стенку потока плазмы усиливается поляризация плазмы пограничного слоя и электрическое поле поляризации в области отражения частиц растет. Sestero [9] удалось численно решить задачу о равновесии пограничного слоя только для условного отношения масс электронов и ионов в 1/3, в то время как для реальной водородной плазмы это отношение составляет 1/1836. Т.о., вопрос о поляризации пограничных слоев и влиянии электрического поля на их устойчивость остается открытым. Например, в одной из последних теоретических работ, посвященных проблеме поляризации магнитоактивной плазмы, по-прежнему используется квазинейтральное приближение [10]. В экспериментальной работе [11] поднимается вопрос о необходимости выяснения природы медленно меняющихся электрических полей, наблюдаемых во время геомагнитных бурь.

Наше исследование эффекта поляризации резко неоднородных структур магнитоактивной плазмы основывается на последовательном решении кинетического уравнения. При таком подходе мы выходим за пределы приближения квазинейтральности и исследуем проблему поляризации во всей её полноте. Электромагнитные свойства среды моделируются тензором диэлектрической проницаемости. Методика вычисления тензора диэлектрической проницаемости развита ранее и опубликована в открытой печати [12].

### 2.3.2 Структура и основные наблюдаемые электромагнитные характеристики магнитопаузы

Магнитопаузой называется пограничный слой между плазмой солнечного ветра и магнитным полем Земли (см, рисунок 1)

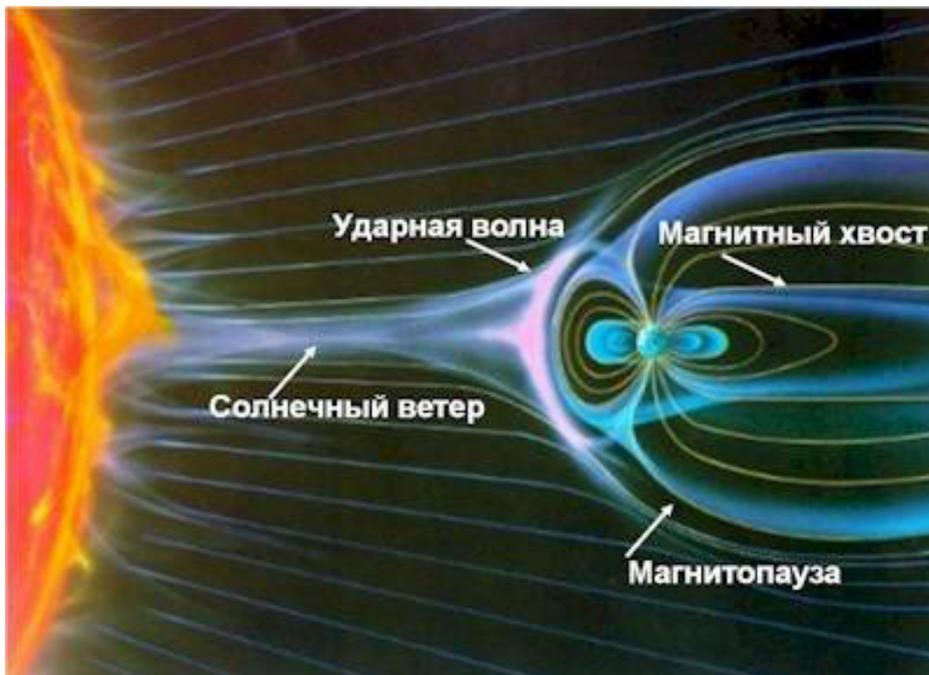


Рисунок 1 – Магнитосфера Земли

Теоретическому исследованию магнитопаузы в квазинейтральном приближении посвящены работы [13, 14]. Экспериментальное исследование границы магнитосферы в рамках программы «Cluster» освещается в работах [15-17]. В этих работах приведены частотные характеристики наблюдаемых электромагнитных полей. Так, компоненты постоянной составляющей электрического поля измеряются в диапазоне от 0.3 до 700 мВ/м, а компоненты переменной составляющей – в диапазоне от 1 до  $10^4$  мкВ/м. Обработаны данные наблюдений в период понижения и минимума солнечной активности с 2000 г. по 2008 г.

В первом приближении можно считать, что магнитопауза представляет собой пограничный слой между плазмой солнечного ветра и магнитным полем Земли. Однако, в магнитосфере присутствует небольшое количество плазмы (значительно меньшее, чем в солнечном ветре), а в солнечном ветре имеется слабое межпланетное магнитное поле, обладающее в зависимости от цикла солнечной активности северной или южной компонентами. Напряженность ММП

значительно меньше напряженности магнитосферного поля. Поэтому более адекватная модель магнитопаузы должна базироваться на теории контактного разрыва – пограничного слоя между двумя состояниями космической плазмы.

### 2.3.3 Постановка задачи

Будем считать, что контактный разрыв расположен в плоскости  $yoz$  (см. рисунок 2), слева и справа от разрыва расположена двухкомпонентная плазма с различным набором характеристик.

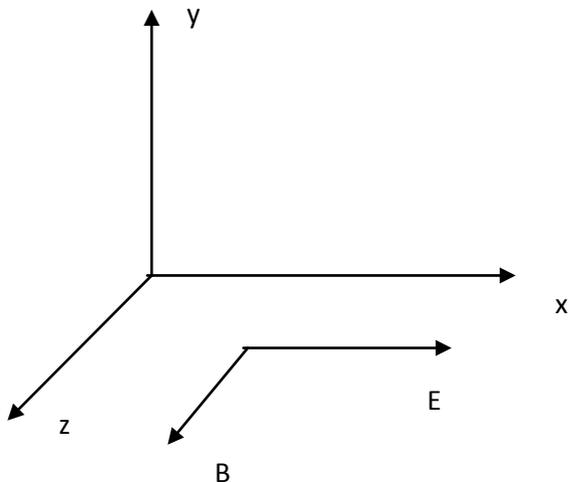


Рисунок 2 – Система координат, связанная с магнитопаузой в лобовой точке магнитосферы

Задача одномерна, все величины зависят от переменной  $x$ . Исследуемая среда описывается системой из кинетического уравнения

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{r}} + e_\alpha \{ \vec{E} + [\vec{v} \vec{B}] \} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{P}} = 0 \quad (1)$$

и уравнений Максвелла с самосогласованным электромагнитным полем (внешние источники отсутствуют)

$$\text{rot} \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \vec{j}, \text{div} \vec{B} = 0, \quad (2)$$

где

$$\vec{j} = \sum_\alpha e_\alpha \int \vec{v} \delta f_\alpha d\vec{P} \quad (3)$$

Задача (1),(2) решается методом теории возмущений

$$f_\alpha(\vec{P}, \vec{r}, x, t) = f_{0\alpha}(\vec{P}) + \check{a} f_\alpha(\vec{P}, \vec{r}, x, t)$$

$$\vec{E}(\vec{r}, x, t) = \vec{E}_0(x) + \ddot{a}\vec{E}(\vec{r}, x, t) \quad (4)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, x, t) = \vec{B}_0(x) + \ddot{a}\vec{B}(\vec{r}, x, t)$$

Плазма считается слабонеровновесной  $\ddot{a}f_\alpha(\vec{P}, \vec{r}, x, t) < f_{0\alpha}(\vec{P})$ . Равновесная функции распределения конструируется как функция от интегралов движения  $f_{0\alpha}(\vec{P}) = f_{0\alpha}(W_\alpha, P_{y\alpha})$ , где полная энергия и обобщенный импульс имеют вид:

$$\begin{aligned} W_\alpha &= \frac{1}{2} m_\alpha (v_x^2 + v_y^2) + e_\alpha \phi(x) \\ P_{y\alpha} &= m_\alpha v_y + e_\alpha A_y(x) \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $\phi(x)$   $A_y(x)$  - электрический и магнитный потенциалы ( $\vec{E}_0 = -grad\phi$ ,  $\vec{B}_0 = rot\vec{A}$ ).

Для вычисления моментов функции распределения перейдем от плоскости координат  $(v_x, v_y)$  к плоскости координат  $(P_y, W)$ , являющихся интегралами движения (5). Каждая полуплоскость координат  $(v_x, v_y)$ , соответственно для  $v_x < 0$  или  $v_x > 0$  проектируется в одну и ту же область интегралов движения, определяемую неравенствами:

$$\begin{aligned} \frac{(P_y \mp Ae_y)^2}{2m_\pm} \pm e\phi \leq W < +\infty, \\ -\infty < P_y < +\infty. \end{aligned} \quad (6)$$

Якобианом перехода преобразований (5) является выражение  $1/m_\pm^2 v_x$ , поэтому интегрирование какой-либо функции  $Q(v_x, v_y)$  выполняется следующим образом:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dv_y \int_{-\infty}^{+\infty} Q(v_x, v_y) dv_x = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} Pd_y \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q[v_x(P_y, W) v_y(P_y, W)]}{W' m_\pm [2m_\pm (W \mp e\phi) - (P_y \mp Ae_y)^2]^{\frac{1}{2}}} Wd \quad (7)$$

где

$$W' = \pm e\phi + (P_y \mp Ae_y)^2 / 2m_\pm \quad (8)$$

Отсюда, плотность заряда и плотность тока вычисляются по формулам:

$$q_\pm(x) = \pm e \int_{-\infty}^{+\infty} dv_y \int_{-\infty}^{+\infty} dv_x f_\pm(x, v_x, v_y) = \pm 2 \frac{e}{m_\pm} \int_{-\infty}^{+\infty} Pd_y \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f_\pm(P_y, W) Wd}{W' [2m_\pm (W \mp e\phi) - (P_y \mp Ae_y)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

$$j_{\pm}(x) = \pm e \int_{-\infty}^{+\infty} v_y dv_y \int_{-\infty}^{+\infty} dv_x f_{\pm}(x, v_x, v_y) = \pm 2 \frac{e}{m_{\pm}} \int_{-\infty}^{+\infty} Pd_y \int_{W'}^{+\infty} \frac{P_y \mp Ae_y}{2m_{\pm}} \frac{f_{\pm}(P_y, W) W d}{[2m_{\pm}(W \mp e\phi) - (P_y \mp Ae_y)]} \quad (10)$$

*Выбор функции распределения.* Для описания равновесной структуры контактного разрыва необходимо выбрать равновесную функцию как функцию от интегралов движения. Эта функция должна быть физически уместной, хорошо моделирующей рассматриваемую ситуацию и в то же время достаточно простой с математической точки зрения. Воспользуемся методикой определения подобной функции распределения, изложенной в работе [18].

$$\begin{aligned} f_{0\alpha}(W_{\alpha}, P_{y\alpha}) &= \frac{n_0 m_{\alpha}}{20\pi} \exp\left(-\frac{W_{\alpha}}{\theta}\right) \text{ при } P_{y\alpha}, \text{ лежащем в области } (-\infty, 0), \\ &= C_{\alpha} \frac{n_0 m_{\alpha}}{20\pi} \exp\left(-\frac{W_{\alpha}}{\theta}\right) \text{ при } P_{y\alpha}, \text{ лежащем в области } (0, +\infty) \end{aligned}$$

(11)

Такой выбор дает достаточно простую модель, описывающую контактный разрыв, т.е. переход плазмы от одного максвелловского состояния к другому. Для простоты температура выбрана одинаковой для обеих компонент (электронов и ионов) и с обеих сторон разрыва.

Введем следующие безразмерные величины:

$$\begin{aligned} \mu_{+} = \mu, \mu_{-} = 1, \mu &= \sqrt{\frac{m_{-}}{m_{+}}}, \varepsilon_{\pm} = \frac{W_{\pm}}{\theta}, p_{\pm} = \pm \frac{P_{y\pm}}{\sqrt{2m_{\pm}\theta}}, \varphi = \frac{e\phi}{\theta}, a = \frac{Ae_y}{\sqrt{2m_{-}\theta}}, \\ q_{\pm} &= \frac{\rho_{\pm}}{en_0}, j_{\pm} = \frac{J_{\pm}}{en_0} \sqrt{\frac{m_{-}}{2\theta}}, \xi = ex \sqrt{\frac{\mu_0 n_0}{m_{-}}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Вычислим плотность заряда (9) и плотность тока (10) для равновесной функции распределения (11) в безразмерных величинах:

$$q_{\pm} = \pm \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} p d_{\pm} s_{\pm}(p_{\pm}) \int_{\varepsilon'}^{+\infty} d\varepsilon \exp(-\varepsilon) [\varepsilon \mp \varphi - (p_{\pm} - \mu_{\pm} a)^2]^{-\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

$$j_{\pm} = \frac{\mu_{\pm}}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} p d_{\pm} (p_{\pm} - \mu_{\pm} a) s_{\pm}(p_{\pm}) \int_{\varepsilon'}^{+\infty} d\varepsilon \exp(-\varepsilon) [\varepsilon \mp \varphi - (p_{\pm} - \mu_{\pm} a)^2]^{-\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

Здесь

$s_{\pm}(p_{\pm}) = 1$  в области  $-\infty < p_{\pm} < 0$ ,  $= \tilde{N}_{\pm}$  в области  $0 < p_{\pm} < +\infty$ , (15)  
безразмерная форма соотношения (8) имеет вид:

$$\varepsilon' = \pm \varphi + (p_{\pm} - \mu_{\pm} a)^2. \quad (16)$$

Можно провести интегрирование по полной энергии:

$$q_{\pm} = \pm \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\varepsilon) \int_{-\infty}^{+\infty} p d_{\pm} s_{\pm}(p_{\pm}) \exp[-(p_{\pm} - \mu_{\pm} a)^2]$$

$$j_{\pm} = \frac{\mu_{\pm}}{\sqrt{\pi}} \exp(-\varepsilon) \int_{-\infty}^{+\infty} p d_{\pm} (p_{\pm} - \mu_{\pm} a) s_{\pm}(p_{\pm}) \exp[-(p_{\pm} - \mu_{\pm} a)^2]$$

Окончательное интегрирование по обобщенному импульсу приводит к выражениям для плотности заряда и плотности тока:

$$q_{\pm} = \pm \exp(\mp \varphi) \cdot [1 - (1 - C_{\pm}) \operatorname{erf}(\mu_{\pm} a)],$$

$$j_{\pm} = -\frac{\mu_{\pm}}{2\sqrt{\pi}} \exp(\mp \varphi) \cdot (1 - C_{\pm}) \exp(-\mu_{\pm}^2 a^2) \quad (17)$$

Интеграл ошибок определяется следующим образом:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2) dt \quad (18)$$

Уравнения для потенциалов самосогласованного электромагнитного поля (2) имеют вид:

$$\frac{d^2 a}{d\xi^2} = -(j_+ + j_-) \quad (19)$$

$$\frac{\varepsilon_0 \mu_0 \theta}{m_-} \frac{d^2 \varphi}{d\xi^2} = -(q_+ + q_-)$$

Система уравнений (19) описывает равновесные магнитное и поляризационное электрическое поле в плазме магнитопаузы.

### 2.3.4 Характеристики равновесного состояния магнитопаузы

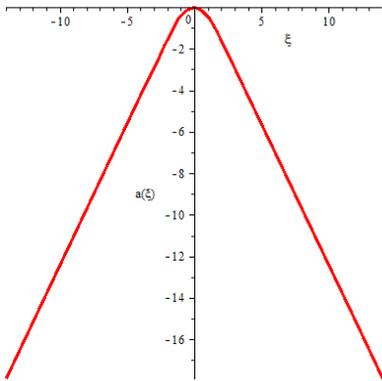
*Профиль магнитного поля контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем.* Оказывается, что система уравнений (19) допускает решение типа токового слоя. Поставим для этой системы следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} \varphi(\xi = 0) &= 0, \\ \varphi'(\xi = 0) &= 0, \\ a(\xi = 0) &= 0, \\ a'(\xi = 0) &= 0. \end{aligned} \quad (20)$$

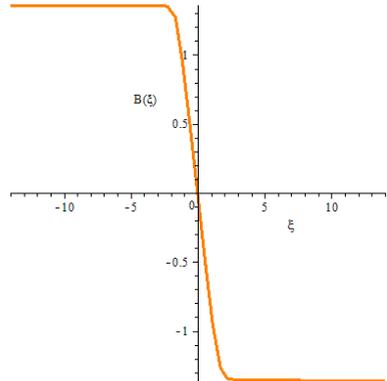
Численное решение задачи (19), (20) проведено в пакете MAPLE-14. На

рисунках 3а, б представлены профиль магнитного потенциала и напряженности магнитного поля контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем.

Магнитное поле одинаково по величине и противоположно по знаку с обеих сторон разрыва.



**а**

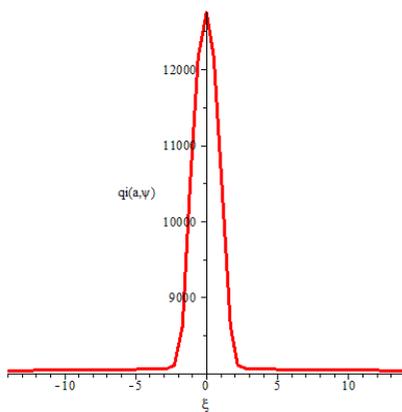


**б**

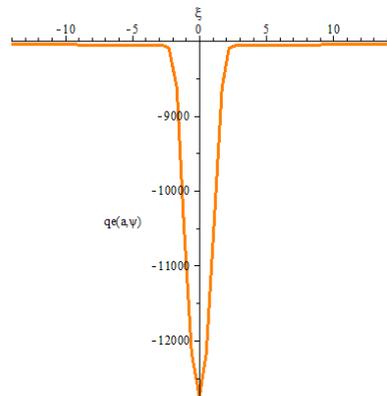
Рисунок 3 – Профиль магнитного потенциала для разрыва с симметричным магнитным полем (а) и профиль индукции магнитного поля для разрыва с симметричным полем (б)

*Профиль плотности компонент плазмы контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем.*

На рисунках 4а,б представлены профили плотности заряда компонент плазмы контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем.



**а**



**б**

Рисунок 4 – Профиль плотности заряда ионов (а) и электронов (б) для разрыва с симметричным магнитным полем

Решения получены при значениях параметров, характерных для магнитосферы:

$$\begin{aligned}
 \mu &= 0.00055, \\
 \varepsilon &= 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \\
 \mu &= 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Г/м} \\
 m_- &= 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \\
 \theta &= 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж},
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Следует отметить, что разрывы подобного типа наблюдались на границе магнитосферы рядом авторов. Таким образом, введенная равновесная функция распределения (6) позволяет моделировать контактный разрыв для двух сред с симметричным магнитным полем.

*Модель контактного разрыва для двух сред со скачком магнитного поля.* Северо-южная компонента межпланетного магнитного поля периодически меняет свой знак с положительного на отрицательный. Рассмотрим вначале случай с положительным направлением ( $B_z > 0$ ). В этом случае направление северо-южной компоненты ММП совпадает с направлением земного магнитного поля на низких широтах. Магнитопаузу в этом случае можно моделировать контактным разрывом со скачком магнитного поля одинакового направления. Уравнения, описывающие равновесную структуру магнитопаузы (19), решаем в приближении метода квазинейтральности. Т.е., решение ищется методом разложения в ряд по

малому параметру  $\frac{\varepsilon_0 \mu_0 \theta}{m_-}$ .

При этом второе уравнение системы (19) превращается в алгебраическое

$$q_+ + q_- = 0 \tag{22}$$

что позволяет выразить электрический потенциал через магнитный:

$$\varphi(a) = \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{g_+(a)}{g_-(a)} \right] \tag{23}$$

Здесь

$$g_+(a) = 1 - (1 - C_+) \operatorname{erf}(\mu a) \tag{24}$$

$$g_-(a) = 1 - (1 - C_-) \operatorname{erf}(a) \tag{25}$$

Условие (22) позволяет вычислить плотность компонент плазмы:

$$n(a) = [g_+(a) \cdot g_-(a)]^{\frac{1}{2}} \tag{26}$$

Подставив выражение для электрического потенциала (23) в первое уравнение системы (19), получим уравнение для магнитного потенциала:

$$\frac{d^2 a}{d\xi^2} = \frac{1 - C_-}{2\sqrt{\pi}} \left[ \frac{g_+(a)}{g_-(a)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp(-a^2) + \mu \frac{1 - C_+}{2\sqrt{\pi}} \left[ \frac{g_-(a)}{g_+(a)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp(-\mu^2 a^2) \tag{27}$$

Первое интегрирование последнего уравнения позволяет получить выражение для магнитного поля:

$$\frac{d^2 a}{d\xi^2} = \frac{1-C_-}{2\sqrt{\pi}} \left[ \frac{g_+(a)}{g_-(a)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp(-a^2) + \mu \frac{1-C_+}{2\sqrt{\pi}} \left[ \frac{g_-(a)}{g_+(a)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp(-\mu^2 a^2)$$

$$B(a) = \frac{da}{d\xi} = [B_0^2 + (1-C_-)I_-(a) + (1-C_+)I_+(a)]^{\frac{1}{2}}, \quad (28)$$

где

$$I_-(a) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^a \left[ \frac{g_+(t)}{g_-(t)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp(-t^2) dt \quad (29)$$

$$I_+(a) = \frac{\mu}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^a \left[ \frac{g_-(t)}{g_+(t)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp(-\mu^2 t^2) dt \quad (30)$$

Проинтегрировав уравнение (28) еще раз, получим связь между пространственной координатой и магнитным потенциалом:

$$\xi = \int_{a_0}^a \pm [B_0^2 + (1-C_-)I_-(a) + (1-C_+)I_+(a)]^{-\frac{1}{2}} da \quad (31)$$

Здесь константа  $B_0$  – это значение индукции магнитного поля при  $\xi = \infty$

Таким образом, получено решение исходной системы (19), позволяющее моделировать контактный разрыв для двух сред со скачком магнитного поля.

*Профиль магнитного поля контактного разрыва для двух сред со скачком магнитного поля.* Выражение (28) позволяет найти зависимость магнитного поля от магнитного потенциала, а затем по формуле (31) можно найти зависимость

магнитного поля от пространственной координаты  $B(\xi)$ . Эта процедура была выполнена численно в пакете MAPLE-14, на рисунках 5а,б представлена зависимость равновесного магнитного поля от магнитного потенциала и пространственной координаты.

Расчеты проведены для тех же значений магнитосферных параметров (21). В качестве граничных условий для уравнения (28) использованы значения:

$$B_0(a_0 = -75) = 0,5. \quad (32)$$

Константы модели приняты равными:

$$C_+ = C_- = 0,25 \quad (33)$$

Полученное решение может моделировать структуру магнитопаузы в ситуации, когда направление северо-южной компоненты ММП совпадает с направлением земного магнитного поля на низких широтах.

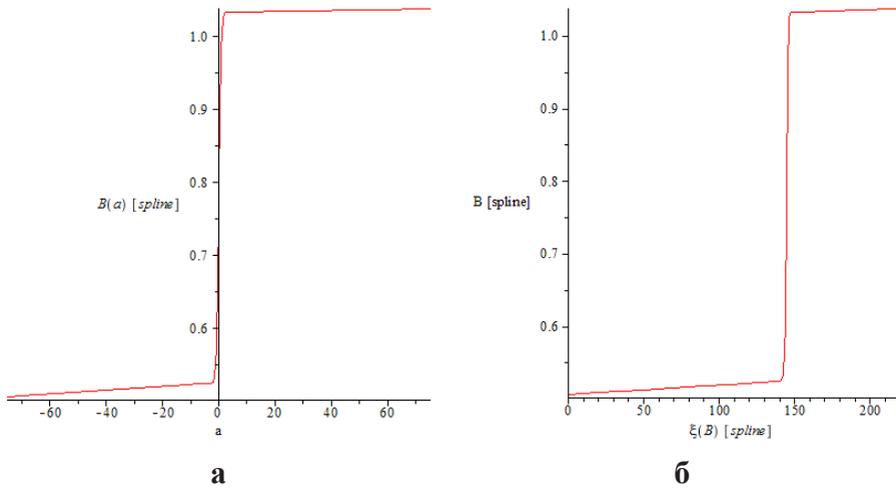


Рисунок 5 – Зависимость индукции магнитного поля от магнитного потенциала (а) и профиль индукции магнитного поля (б) для разрыва со скачком магнитного поля

*Профиль плотности компонент плазмы контактного разрыва для двух сред со скачком магнитного поля.* Зависимость плотности компонент плазмы от магнитного потенциала рассчитывается по формуле (26), а затем, используя формулу (31) можно найти зависимость плотности компонент плазмы от пространственной координаты  $n(\xi)$ . На рисунках 6а,б представлена зависимость плотности компонент плазмы равновесной магнитопаузы от магнитного потенциала и пространственной координаты.

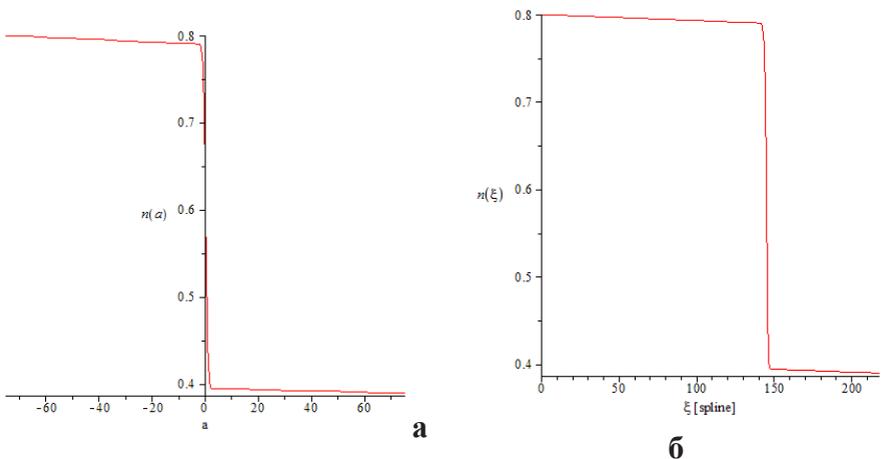


Рисунок 6 – Зависимость плотности плазмы от магнитного потенциала (а) и профиль плотности плазмы (б) для разрыва со скачком магнитного поля

Расчеты проведены в пакете MAPLE-14 для значений магнитосферных параметров (21), граничных условиях (32) и значениях свободных параметров (33). Из графика на рисунке 5б видно, что в магнитопаузе магнитное поле меняется от малого значения в области солнечного ветра до большого значения в области магнитосферы. Известно, что плотность плазмы солнечного ветра на орбите Земли составляет примерно  $5 \text{ ч/см}^3$ . График рисунка 6б свидетельствует, что плотность плазмы при этом падает в области магнитосферы приблизительно на порядок, что соответствует экспериментальным данным. При этом сумма динамического давления частиц плазмы и электромагнитного поля по толщине стационарной магнитопаузы остается постоянным.

Предложенная методика исследования и выбранная функция распределения (11) позволили смоделировать стационарную магнитопаузу в области лобовой точки магнитосферы. Для случая симметричного магнитного поля магнитопауза моделируется как токовый слой с симметричным магнитным полем. Для случая, когда северо-южная компонента ММП сонаправлена земному магнитному полю, магнитопауза моделируется как контактный разрыв со скачком магнитного поля.

*Модель контактного разрыва для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности.* Рассмотрим теперь случай с отрицательным направлением компоненты  $B_z < 0$ . Направление северо-южной компоненты ММП антинаправлено по отношению земному магнитному полю на низких широтах. Магнитопаузу в этом случае можно моделировать контактным разрывом со скачком магнитных полей противоположных направлений. Основой моделирования являются уравнения (19), решаемые в приближении метода квазинейтральности.

Магнитное поле слева от контактного разрыва (в области магнитосферы) рассчитывается по формуле (28), а справа от разрыва (в области солнечного ветра), где оно является отрицательным, по формуле:

$$B(a) = \frac{d}{d\xi} = -[B_0^2 + (1 - C_-)I_-(a) + (1 - C_+)I_+(a)]^{\frac{1}{2}} \quad (34)$$

В качестве параметров задавались те же значения (21), характерные для магнитосферы. Моделирование основано на сшивании двух решений (с двумя наборами свободных параметров модели): левой части одного решения и правой части другого. Расчеты проведены для двух наборов свободных параметров:

$$1) C_+ = C_- = 4,0, B_0(a_0 = -5500) = 1,5, \quad (35)$$

$$2) C_+ = C_- = 0,9, B_0(a_0 = -5500) = 0,0. \quad (36)$$

Точка сшивания  $\xi^*$  определяется как точка в структуре контактного разрыва, где индукция магнитного поля в обоих решениях достигает нуля  $\hat{A}(\xi^*) = 0$ . Все рассчитанные функции сшивались в этой точке  $\xi^*$ . При этом формула для расчета плотности компонент плазмы (26) уточняется на некоторый коэффициент  $K$ :

$$n(a) = K[g_+(a) \cdot g_-(a)]^{\frac{1}{2}}. \quad (37)$$

Этот коэффициент  $K$  определяется из условия баланса давлений:

$$\frac{\varepsilon_0 E^2(\xi)}{2} + \frac{B^2(\xi)}{2\mu_0} + [n_i(\xi) + n_e(\xi)] \theta = const \quad (38)$$

и при параметрах (35), (36) имеет значение  $K = 2,22$ .

*Профиль магнитного поля контактного разрыва для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности.* Зависимость магнитного поля от магнитного потенциала рассчитана по формулам (34), (35), (36), а затем по формуле (31) найдена зависимость магнитного поля от пространственной координаты  $B(\xi)$ . Эта процедура была выполнена численно в пакете MAPLE-14, на рисунках 7а,б представлена зависимость равновесного магнитного поля от магнитного потенциала и пространственной координаты.

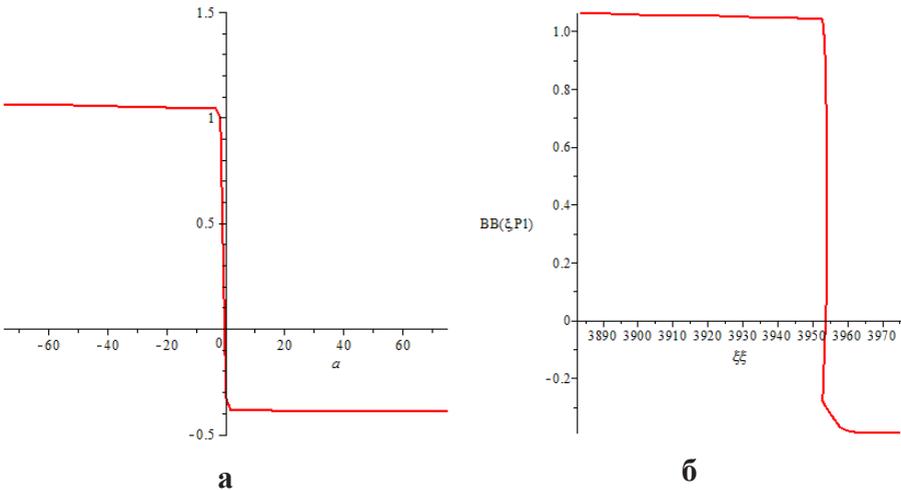


Рисунок 7 – Зависимость индукции магнитного поля от магнитного потенциала (а) и профиль индукции магнитного поля (б) для разрыва с антинаправленными магнитными полями

Полученное решение может моделировать структуру магнитопаузы в ситуации, когда направление северо-южной компоненты ММП антинаправлено земному магнитному полю на низких широтах.

*Профиль плотности компонент плазмы и электрического потенциала контактного разрыва для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности.* Зависимость плотности компонент плазмы от магнитного потенциала рассчитывается по формуле (37), а затем, используя формулу (31)

можно найти зависимость плотности компонент плазмы от пространственной координаты  $n(\xi)$ . На рисунках 8 а,б представлена зависимость плотности компонент плазмы равновесной магнитопаузы от магнитного потенциала и пространственной координаты.

Из рисунков 7б и 8б видно, что слева (в области магнитосферы) магнитное поле велико, а плотность плазмы мала по сравнению с их значениями справа (в области солнечного ветра). При этом всюду по толщине переходного слоя сумма динамического давления частиц плазмы и электромагнитного поля остается величиной постоянной, т.е. выполняется соотношение (38).

Созданная модель позволяет рассчитать электрический потенциал. На рисунке 9а представлен профиль электрического потенциала в зависимости от магнитного потенциала, рассчитанный по формуле (23). Используя связь магнитного потенциала с расстоянием (31), можно найти зависимость электрического потенциала от толщины контактного разрыва, см. рисунок 9б.

На основе выбранной функции распределения создана модель контактного разрыва для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности. Рассмотрена ситуация с отрицательным направлением компоненты ММП  $B_z < 0$ . Магнитопаузу в этом случае можно моделировать контактным разрывом для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности.

Уравнения, описывающие равновесную структуру магнитопаузы, решены в приближении квазинейтральности. Расчеты проведены в пакете MAPLE-14 при значениях параметров, характерных для магнитосферы. Изучены характеристики равновесного состояния магнитопаузы.

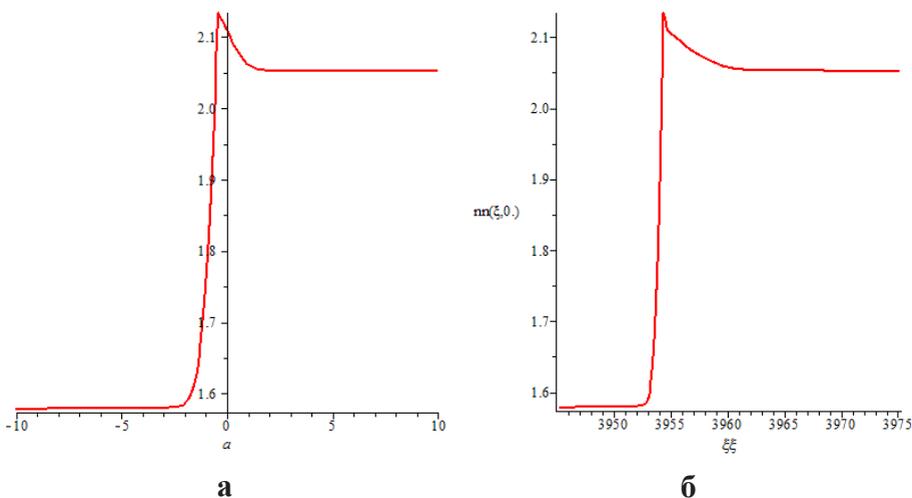


Рисунок 8 – Зависимость плотности плазмы от магнитного потенциала (а) и профиль плотности плазмы (б) для разрыва с антинаправленными магнитными полями

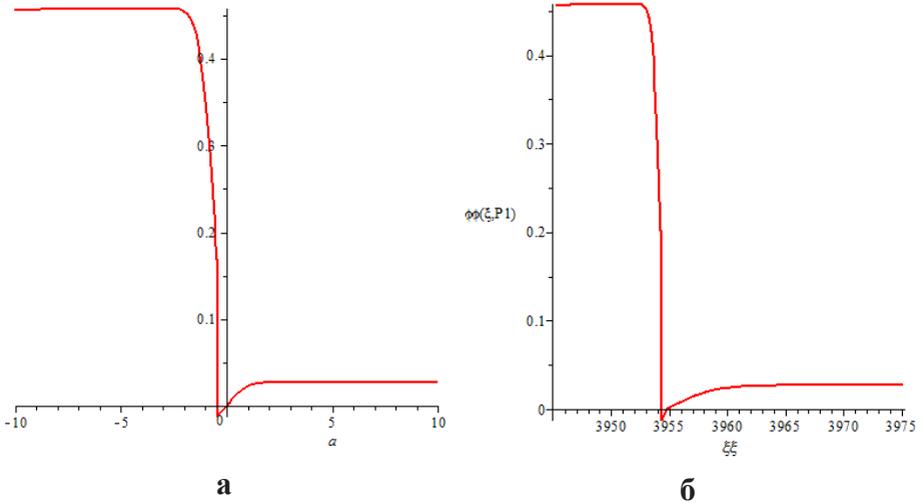


Рисунок 9 – Зависимость электрического потенциала от магнитного потенциала (а) и профиль электрического потенциала (б) для разрыва с антинаправленными магнитными полями

Получен профиль магнитного поля исследуемого контактного разрыва. Магнитное поле в магнитопаузе меняется от малого отрицательного значения в области солнечного ветра до большой положительной величины в области магнитосферы.

Исследованы пространственные характеристики плотности компонент плазмы и электрического потенциала равновесной магнитопаузы. Вычислены профили плотности компонент плазмы и электрического потенциала изучаемого контактного разрыва. Вдали от магнитопаузы (глубоко в области солнечного ветра или в области магнитосферы) профиль электрического потенциала представляет собой константу, так что все изменение потенциала приходится на окрестность контактного разрыва.

Предложенная методика исследования и выбранная функция распределения позволили смоделировать стационарную магнитопаузу в области лобовой точки магнитосферы в случае антинаправленных магнитных полей (межпланетного и земного) разной напряженности.

**2.3.5 Свойства поляризованного электрического поля равновесной магнитопаузы** Исследована поляризация спокойной магнитопаузы в окрестности подсолнечной точки.

*Исследование поляризованного электрического поля контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем.* Численное решение задачи (19), (20) позволяет рассчитать электрический потенциал и напряженность самосогласованного электрического поля. Решение проведено в пакете MAPLE-14. На рисунках 10 а, б представлены профиль электрического

потенциала и напряженности электрического поля контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем.

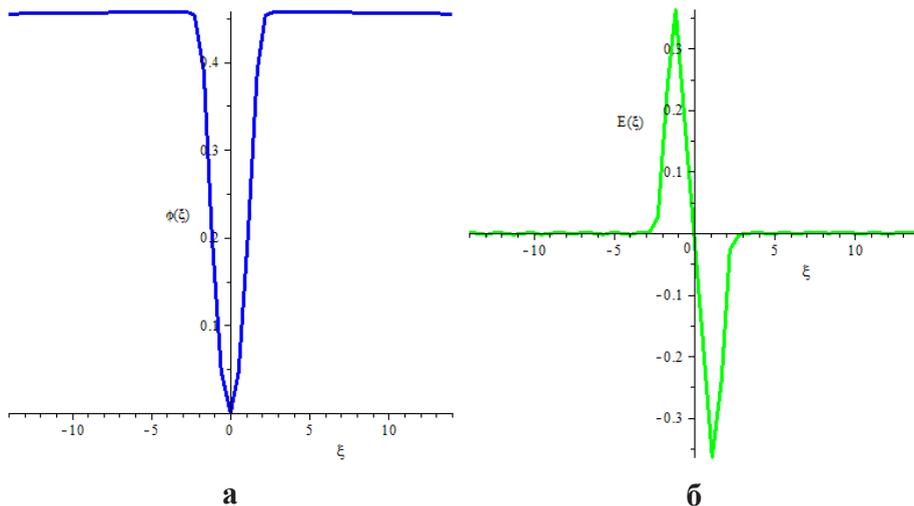


Рисунок 10 – Профиль электрического потенциала (а) и профиль напряженности электрического поля (б) для разрыва с симметричным магнитным полем

Видно, что электрическое поле соответствует двойному слою и сосредоточено внутри контактного разрыва.

*Исследование поляризованного электрического поля контактного разрыва для двух сред со скачком магнитного поля.*

На рисунке 11а представлена зависимость электрического потенциала от толщины контактного разрыва. Расчеты по формулам (23) и (31) проведены в пакете MAPLE-14. Профиль напряженности электрического поля, представленный на рисунке 11б, получен методом численного дифференцирования функции электрического потенциала

$$E(\xi) = -d\phi(\xi)/d\xi \quad (39)$$

Как видно, поляризованное электрическое поле сосредоточено в узкой области контактного разрыва.

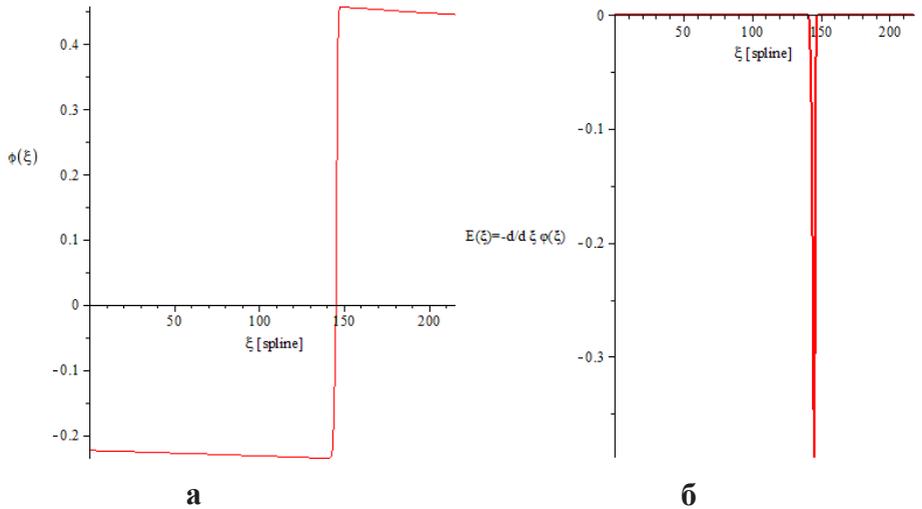


Рисунок 11 – Профиль электрического потенциала (а) и профиль напряженности электрического поля (б) для разрыва со скачком магнитного поля

*Исследование поляризованного электрического поля контактного разрыва для двух сред с антинеправленными магнитными полями разной напряженности.* На рисунке 12 представлена зависимость напряженности электрического поля от толщины контактного разрыва. Расчеты по формулам (23), (31) и (39) проведены в пакете MAPLE-14.

Видно, что электрическое поле медленно меняется слева от разрыва (в области магнитосферы), оставаясь отрицательным с плавным экстремумом. В самом контактном разрыве электрическое поле резко меняется на положительное, достигая большого значения в максимуме. Справа от разрыва (в области солнечного ветра) электрическое поле опять становится отрицательным. Расчеты электрических полей для контактных разрывов разных типов выполнены для тех же параметров (21), характерных для магнитосферы.

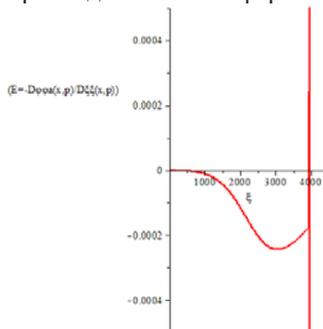


Рисунок 12 – Профиль напряженности электрического поля для разрыва с антинеправленными магнитными полями

## Заключение

Подсолнечная область магнитопаузы моделируется плоским контактным разрывом. Исследуемая среда описывается системой из кинетического уравнения с самосогласованным электромагнитным полем (уравнение Власова). Для описания равновесной структуры контактного разрыва выбрана равновесная функция распределения, являющаяся функцией интегралов движения и представляющая собой модификацию распределения Максвелла. С помощью этой функции распределения вычислена плотность частиц и плотность тока и получены стационарные уравнения для электромагнитных потенциалов. Эти уравнения представляют собой систему автономных дифференциальных уравнений.

Численное решение задачи при значениях параметров, характерных для магнитосферы проведено в пакете MAPLE-14, получен профиль напряженности магнитного поля контактного разрыва для двух сред с симметричным магнитным полем. Представлены пространственные характеристики плотности компонент плазмы исследуемого контактного разрыва.

Рассчитаны профили магнитного поля и плотности плазмы стационарного контактного разрыва для двух сред со скачком магнитного поля. Магнитное поле в магнитопаузе меняется от малого значения в области солнечного ветра до большого значения в области магнитосферы. Полученное решение свидетельствует, что плотность плазмы при этом падает в области магнитосферы приблизительно на порядок, что соответствует экспериментальным данным. При этом сумма динамического давления частиц плазмы и электромагнитного поля по толщине стационарной магнитопаузы остается постоянным.

Создана модель контактного разрыва для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности. Рассмотрена ситуация с отрицательным направлением компоненты межпланетного магнитного поля  $B_z < 0$ . В этом случае направление северо-южной компоненты ММП антинаправлено земному магнитному полю на низких широтах. Магнитопаузу в этом случае можно моделировать контактным разрывом для двух сред с антинаправленными магнитными полями разной напряженности.

Исследована поляризация стационарной магнитопаузы в окрестности подсолнечной точки для случаев с 1) антинаправленными симметричными магнитными полями 2) скачком магнитного поля одного направления и 3) антинаправленными магнитными полями разной напряженности.

Предложенная методика исследования и выбранная функция распределения позволили смоделировать стационарную магнитопаузу в области лобовой точки магнитосферы и исследовать её поляризацию. Полученные профили плотности плазмы и электромагнитного поля необходимы для дальнейшего исследования устойчивости магнитопаузы.

*Работа выполнена по программе 101 «Грантовое финансирование научных исследований» в рамках темы «Изучить структуру и динамику магнитопаузы – пограничного слоя между плазмой солнечного ветра и магнитным полем Земли».*

## Список литературы

- [1] *Chapman S., Ferraro V.C.A.* A new theory of magnetic storms: Part I – The initial phase. // *Terr. Magn. Atmos. Elect.* –1931. –V. 36, № 1. –P. 77-97.
- [2] *Chapman S., Ferraro V.C.A.* A new theory of magnetic storms: Part II – The main phase. // *Terr. Magn. Atmos. Elect.*– 1933.– V. 38, N 1.– P. 79-96.
- [3] *Паркер Е.* Динамические процессы в межпланетной среде. //М., Мир.– 1965. –362 с.
- [4] *Grad H.* Boundary layer between a plasma and magnetic field. // *Phys. Fluids.*– 1961.–V. 4, № 11.–P. 1366-1375.
- [5] *Schindler K., Birn J.* Models of two-dimensional embedded thin current sheets from Vlasov theory. // *J. Geophys. Res.* –2002.– V.107, № A8. 1193, doi: 10.1029/2001JA000304.
- [6] *Silin I., Buchner J., Zelenyi L.* Instabilities of collisionless current sheets: Theory and simylatios. // *Physics of Plasmas.*–2002.– V. 9, № 4.– P. 1104-1112.
- [7] *Yoon P.H., Lui A.T.Y.* Model of ion- or electron-dominated current sheet. // *J. Geophys. Res.* doi:10.1029/2004JA010555. –2004.–V.109.–P. A11213.
- [8] *Шабанский В. П.* Структура переходного слоя между плазмой и магнитным полем.// *ЖЭТФ.*–1961.–Т. 40, № 4.– С. 1058-1064.
- [9] *Sestero A.* Charge separation effect in the Ferraro-Rosenbluth cold plasma sheath model.// *Phys. Fluids.* –1965.– V. 8, № 4.–P. 739-744.
- [10] *Harrison.M.G., Neukirch T.* Some remarks on one-dimensional force-free Vlasov-Maxwell equilibria. // *Phys. Plasm.*–2009.– V.16.–P. 022106-1 – 022106-9.
- [11] *Лазутин Л.Л., Гоцелюк Ю.В., Муравьева Е.А.* и др. Динамика солнечных протонов в магнитосфере Земли во время магнитных бурь в ноябре 2004-января 2005 // *Геомагнетизм и аэрономия.* -2010.- Т. 50, № 2. –С.176-188.
- [12] *Lyahov V.V., Neshchadim V.M.* Kinetic theory of the current sheath. II. Effect of polarization on the stability of a current sheath// *Advances in Space Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.10.006>
- [13] *Alpers W.* Steady state charge neutral models of the magnetopause// *Astroph. Space Sci.*–1969.–V.5.– P. 425-437.
- [14] *Alpers W.* On the equilibrium of an exact charge neutral magnetopause// *Astroph. Space Sci.*–1971.– V.11. –P. 471-474.
- [15] *Amata E.* et all. Experimental study of nonlinear interaction of plasma flow with charged thin current sheets: 1. Boundary structure and motion//[www.nonlin-processes-geophys.net/13/365/2006/](http://www.nonlin-processes-geophys.net/13/365/2006/).
- [16] *Savin S.* et all. Experimental study of nonlinear interaction of plasma flow with charged thin current sheets: 2. Hall dynamics, mass and momentum transfer//[www.nonlin-processes-geophys.net/13/377/2006/](http://www.nonlin-processes-geophys.net/13/377/2006/).
- [17] *Taktakisvili A.* et all. Ion escape from the high latitude magnetopause: analysis of oxygen and proton dynamics in the presence of magnetic turbulence// *Ann. Geophys.* –2007.–V. 25. –P. 1877-1885.
- [18] *Sestero A.* Structure of Plasma Sheaths // *Phys. Fluids.*–1964.– V. 7, N1.–P. 44-51.

## 2.4 ВЫЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ФОНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ АТМОСФЕРЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ И В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ В ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ

*Жумабаев<sup>1</sup> Б.Т., Краснов<sup>2</sup> В.М., Салихов<sup>1</sup> Н.М., Дробжева<sup>2</sup> Я.В., Нұрғалиева<sup>1</sup> Қ.Е., Сомиков<sup>1</sup> В.М.*

<sup>1</sup>ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», г.Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>РГГМУ, г. Санкт-Петербург, Россия

### 2.4.1 Введение

В последние годы проблема изучения взаимосвязи динамических процессов на Земле и в атмосфере приобрела большую актуальность. Это обусловлено необходимостью обеспечения своевременного прогноза катастрофических явлений. В связи с этим возникла потребность в развитии эффективных методов исследования Земли на основе современных космических технологий. Для создания и развития таких методов нужно понять физику явлений взаимодействия процессов в земной коре и в атмосфере.

Одним из главных «переносчиков» энергии и импульса от поверхности Земли до высот ионосферы являются волновые возмущения, включая инфразвуковые волны. Возбужденные на поверхности Земли, волновые структуры атмосферы пронизывают всю ее толщу и возмущают ионосферную плазму. Поглощение волновых структур на высотах ионосферы могут приводить к значительным вариациям температуры нейтральных частиц, и как следствие, к увеличению свечения ночного неба. В связи с этим одним из важнейших фундаментальных и прикладных направлений современной геофизики является исследования источников и условий распространения волновых структур в атмосфере. При этом изучаются волновые структуры, возникающие в атмосфере в результате схода лавин, развития торнадо, грозных бурь, шторма в океане, извержений вулканов и землетрясений (в том числе и в океане). Исследуется атмосферная турбулентность во время полета самолетов, болидов и метеоритов. Изучается структура акустического шума в городах и др. Проводятся наблюдения свечения ночного неба, электрического поля и микровариаций давления. Они позволяют изучать волновые возмущения, включая инфразвуковые и внутренние гравитационные волны от различных источников энергии на Земле или в приземной атмосфере.

Учитывая тот факт, что ряд южных областей Казахстана и г.Алматы находятся в сейсмоопасных зонах, нами выполняются работы по решению проблемы краткосрочного прогноза землетрясений. Современные мировые тенденции в области прогноза землетрясений предполагают привлечение новых методов, высокую степень автоматизации сбора регистрируемых геофизических параметров и оперативный анализ результатов. В связи с этим расширяется экспериментальная база наблюдений. Так, для получения данных о

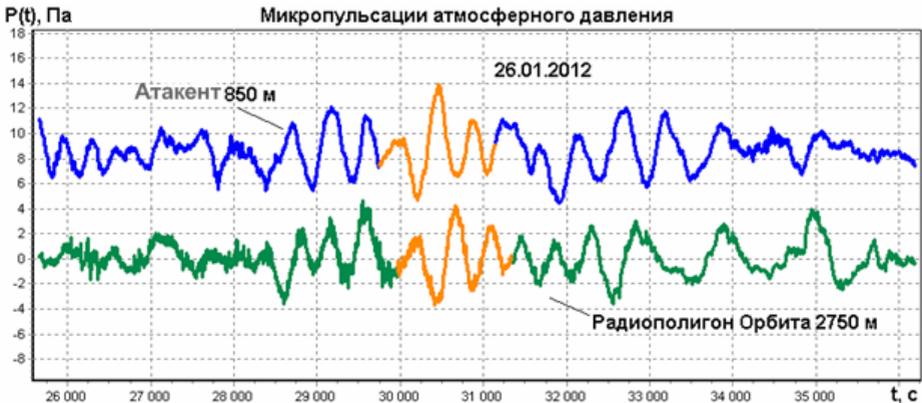
микропульсациях атмосферного давления в предгорной местности разработан и создан временный пункт наблюдения Атакент за микровариациями атмосферного давления, находящийся на высоте около 850 м над уровнем моря в районе с географическими координатами [43° 13' 01" СШ; 76° 54' 22" ВД]. На основе этих данных, при сопоставлении их с данными, полученными на радиополигоне «Орбита» на высоте 2750 м над уровнем моря [43°03'30" СШ; 76°58'23" ВД], изучены особенности распространения фоновых инфразвуковых возмущений, определены скорости их распространения.

Ниже приведены результаты наших исследований возмущений атмосферы во время различных геофизических событий.

#### **2.4.2 Прогностические признаки землетрясений**

Из литературных источников известно, что в приземной атмосфере регистрируются волны с периодами около 600 с и более, вызываемыми газовыми выделениями из трещин литосферы при возрастании сейсмической активности и распространяющиеся на значительные расстояния, наблюдения за которыми может быть использовано в качестве прогностического признака подготовки крупных землетрясений [1]. Нами было замечено, что в фоновых записях микропульсаций атмосферного давления регулярно присутствуют колебания в инфразвуковом диапазоне волн с периодами 400-800 с и более, причем интенсивность этих колебаний изменяется в течение суток. Регулярное присутствие этих колебаний в микропульсациях атмосферного давления существенно осложняет задачу идентификации волн в приземной атмосфере, связанных с литосферными процессами.

Одновременная регистрация фоновых микропульсаций атмосферного давления в двух пунктах наблюдения позволила проследить за распространением возмущений с периодом 400-800 с от пункта регистрации Атакент до пункта радиополигон «Орбита». На рисунке 1 приведен фрагмент из суточной записи микропульсаций  $P(t)$  для пунктов Атакент и радиополигона «Орбита» за 26 января 2012 г. в возмущенный день. На этих записях желтым цветом выделены одинаковые по длительности фрагменты, визуально похожие друг на друга. Из рисунка 1 видно, что цуг колебаний на радиополигоне «Орбита» появился позже, чем на пункте Атакент. Это связано с тем, что возмущение распространяется от предгорной местности в сторону горной местности. На основе результатов корреляционного анализа была проведена оценка скорости распространения возмущения, которая составила 86,85 м/с, данная скорость не может быть сопоставлена ни со скоростью звука в атмосфере, ни со скоростью ветра. В связи с этим вопрос об источнике таких фоновых возмущений и механизме их распространения остается открытым.



Графики сдвинуты по оси Y. По оси X - время от начала суток 26.02012 по времени GMT в секундах.

Рисунок 1 – Сравнение микропульсаций атмосферного давления на радиополYGONе «Орбита», 2750 м и пункте Атакент, 850 м во время регистрации возмущений

### 2.4.3 Особенности фоновых возмущений атмосферы

Регулярные наблюдения за микропульсациями атмосферного давления (МПАД) позволили определить их фоновый спектральный состав. Колебания МПАД имели периоды от нескольких сот секунд до 1100-1200 секунд. Фоновая амплитуда этих колебаний в «спокойные дни» была на уровне 2-4 Па. Наши измерения показали, что в приземной атмосфере колебания с периодами в сотни секунд (от 350 до 800-900с) могут существенно меняться по амплитуде от фоновых значений - 2-4 Па до 10-15 Па, а в отдельных случаях могут достигать более 50 Па. Время их наблюдения менялось от 30-40 мин до нескольких часов (рисунок 2). Вначале наблюдаем фоновые микропульсации атмосферного давления с амплитудой 2-4 Па, далее появляется возмущение с очень четкой (синусоидальной) периодической структурой, длительность которого равна 3,5 часам и опять фоновые с амплитудой 2-4 Па. Вопрос об источнике таких возмущений в настоящее время остается открытым.

Анализ суточных записей микропульсаций атмосферного давления  $P(t)$  выявил особенности на записях - увеличение амплитуды МПАД во время восхода солнца на радиополYGONе «Орбита». Увеличение амплитуды МПАД свойственны приземной атмосфере при воздействии на нее нерегулярных источников возмущений атмосферы. К таким источникам относятся погодные фронты, ветер, грозы, извержение вулканов, землетрясения [2-3]. Помимо нерегулярных источников существует регулярный источник возмущений атмосферы. Им является солнечный терминатор (СТ) [4]. Поэтому представляет интерес выяснить, каков характер МПАД имеет место в переходные часы суток.



По оси X – время от начала суток по времени GMT в секундах.

Рисунок 2 – Запись вариаций P(t) во время прихода на микробарограф синусоидального возмущения

На рисунке 3 приведены типичные записи МПАД во время восхода Солнца. Вертикальной линией обозначено время (23ч12мин GMT) восхода Солнца 10.06.2011 г.



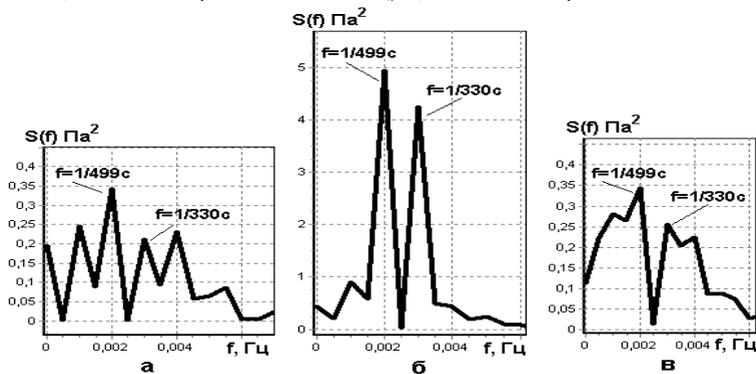
По оси X – время от начала суток по времени GMT в секундах. Графики сдвинуты по оси Y.

Рисунок 3 – Микропульсации атмосферного давления на радиополигоне «Орбита» во время восхода Солнца

Видим, что время реакции приземной атмосферы на восходе радиополигона «Орбита», равно 58 мин, возмущения в МПАД длятся примерно 1,5 - 2 часа. Такая задержка связана с закрытием горами атмосферы в районе регистрации возмущений.

Для определения спектрального состава возмущений рассчитывалась последовательность спектров мощности по каждой кривой. На рисунке 4 представлены усредненные спектры мощности, рассчитанные по данным за 10.06.2011 г. Видно, что во время восхода Солнца (рисунок 4б) на спектре мощности присутствуют два четко выраженных пика с частотами  $f=1/499$ с и  $1/330$ с. При сравнении усредненных спектров мощности до восхода (рисунок 4а),

во время восхода (рисунок 4б) и после восхода Солнца (рисунок 4в) на всех трех спектрах мощности присутствуют пики с частотами  $f=1/499\text{с}$  и  $1/330\text{с}$ . Во время восхода мощность спектральных пиков существенно возрастает.



а)-до восхода Солнца; б)-во время восхода Солнца; в)-после восхода Солнца.

Рисунок 4 – Спектры мощности за 10.06.2011 г.

#### 2.4.4 Разработка оптимальных алгоритмов для целенаправленного поиска аномалий электрического поля и микровариаций давления перед землетрясениями

Аналитический обзор работ [5] по многолетним наблюдениям электромагнитного излучения и электротеллурических полей, в принципе, не позволяет, сделать однозначный вывод о существовании электромагнитных предвестников землетрясений, хотя связь между изменениями магнитного поля и толчками при землетрясении установлена. Излучение электромагнитного поля может происходить благодаря пьезомагнитным и пьезоэлектрическим эффектам во время деформации горных пород, при изменении проводимости пород под действием давления и др. Электрокинетические возмущения поля могут возникать при выходе потока лавы вулканов на поверхность [5, 6]. Установлено, что высокочастотные электромагнитные волны сильно поглощаются в земной коре, и только электромагнитные волны с частотой порядка 0.1 Гц и меньше могут распространяться из сейсмогенных глубин до поверхности Земли [5]. Выявленные аномалии при Капчагайском землетрясении удовлетворяют этому условию. В этой связи можно предположить, что регистрируемые на сейсмостанциях электромагнитные импульсы с длительностью 1-16 мкс могут отражать электромагнитные свойства пород только в непосредственной близости к пункту измерения.

Измерения электрического поля на поверхности Земли обладают малой помехозащищенностью, и требуют дополнительных мер для идентификации сигнала на фоне помех [5]. Причинами изменения наземного электрического поля могут быть:

- изменения земных токов, связанных с процессами, происходящими внутри Земли;

- изменения ионосферной токовой системы под действием различных факторов (включая причины внеземного происхождения), которые в свою очередь приводят к изменению земных токов;
- изменение атмосферного электричества под действием погодных явлений в приземной атмосфере;
- работа искусственных источников электромагнитных волн.

Очевидно, что при проведении измерений электрического поля в подземных сооружениях, воздействие атмосферного электричества в значительной степени будет ослаблено. Однако в этом случае необходимо допустить выполнение условия: электрические свойства почвы (диэлектрическая проницаемость и проводимость) по пути распространения электромагнитного сигнала от источника, находящегося внутри Земли, до подземного пункта наблюдения обеспечат необходимый для регистрации уровень амплитуды поля. В то же время «благоприятный» выход сигнала на поверхность Земли возможен вдоль направления, отличного от направления на подземный пункт наблюдения, и дальнейшее его распространение в атмосфере до наземного пункта регистрации будет происходить без существенного поглощения.

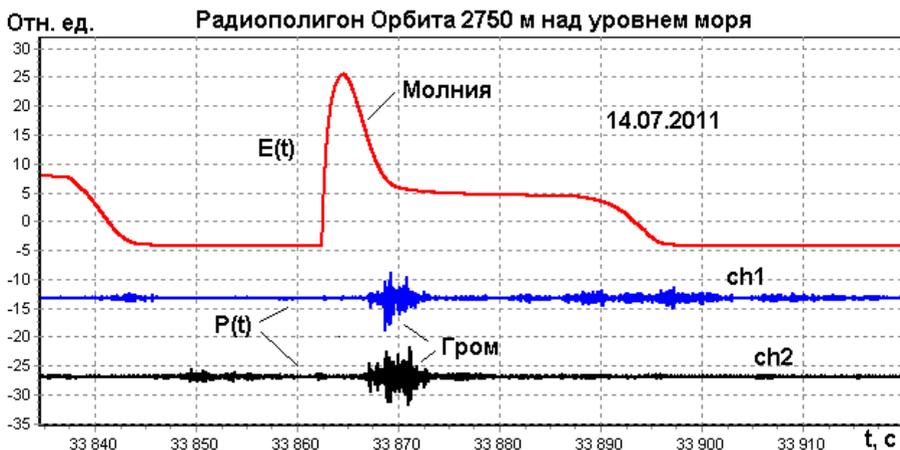
Особенностью измерений электрического поля на радиополигоне «Орбита» являются синхронные наблюдения микровариаций давления, позволяющие, при совместной обработке выделять явления, связанные с атмосферным электричеством.

Изменения ионосферных токов, как правило, сопровождаются значительными изменениями геомагнитного поля, вариации которого, в частности, с высокой точностью регистрируются геомагнитной обсерваторией ДТОО «Института ионосферы», входящей в Международную сеть геомагнитных обсерваторий INTERMAGNET. Учитывая малое расстояние между геомагнитной обсерваторией и пунктом наблюдения электрического поля на радиополигоне «Орбита» (порядка 10 км), эти изменения поля также могут быть идентифицированы. Естественно, магнитометры обладают высокой чувствительностью и к изменениям земной составляющей магнитного поля. Однако, не всегда возмущения электрического поля сопровождаются достаточными по амплитуде геомагнитными возмущениями, которые могут быть зарегистрированы магнитометрами. Например, по данным французского спутника «DEMETER» в ряде случаев датчики электрического поля фиксируют возмущения, а на записях магнитометров их не видно [7].

Погодные явления, в частности, прохождение грозových облаков над местом измерений и молнии могут вносить существенный вклад в записи электрического поля. Для их идентификации одновременно с записями электрического поля на радиополигоне «Орбита» проводятся измерения микровариаций давления. На рисунке 5 показан пример одновременной регистрации молниевых разрядов и грома. Видно четкое временное соответствие выбросов электрического поля и инфразвуковых сигналов.

Для идентификации метеоявлений и исключения их из рассмотрения в разработанной программе предусмотрено, наряду с поиском и идентификацией возмущений электрического поля, проверка наличия сопутствующих возмущений

в микровариациях давления. Для этого используется следующий алгоритм. Вводятся записи микровариаций давления канала Ch2 (обеспечивающего подавление локальных вариаций давления с помощью пространственного фильтра). Затем, для момента регистрации электрического импульса выделяется участок записи данных микровариаций давления на интервале 1 мин до регистрации электрического импульса и 1 мин после регистрации. С помощью фильтра выделяются высокочастотные колебания с длительностью меньше 10с. Проводится расчет среднеквадратичного отклонения ( $\sigma$ ) фоновой амплитуды микровариаций давления на интервале записи 6с, предшествующем появлению электрического импульса. Устанавливается порог  $\text{rog}=5\sigma$ . Далее в течение 1 мин последовательно с интервалом 6с рассчитывается среднеквадратичное отклонение. При превышении значения порога делается вывод об «атмосферном происхождении» электрического импульса и отсутствии аномалии, связанной с подготовкой землетрясения. В файл out2.dat записывается номер электрического импульса, которому сопутствует приход инфразвукового сигнала. Интервал поиска инфразвука в течение 1мин после регистрации электрического импульса выбран из следующих соображений. Гром распространяется со скоростью  $\sim 300\text{м/с}$ . За время 1 мин инфразвук от молнии может пройти расстояние  $\sim 18\text{км}$ . Таким образом, оказывается возможен контроль инфразвуковых разрядов на расстоянии от 0 до 18 км. Увеличивать расстояние не имеет смысла, так как гроза будет происходить, практически, за горизонтом. На таком расстоянии, как электрическое, так и инфразвуковое поле сигналов будет сильно ослабленным, и уровень сигналов будет сравним с уровнем помех.

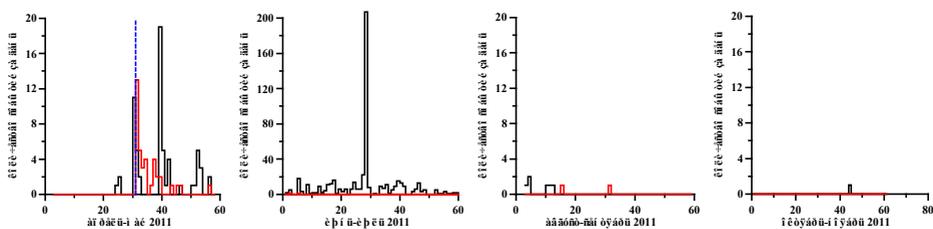


По оси X - время от начала суток 17.07.2011 г по времени GMT в секундах

Рисунок 5 – Одновременная регистрация вариаций атмосферного электричества E(t) и инфразвуковых сигналов P(t) во время молний и грома на радиополигоне «Орбита»

Для изучения связи наблюдаемых особенностей в микровариациях давления и возмущении электрического поля до, во время и после землетрясений был проведен статистический анализ по одновременным непрерывным записям электрического поля и микровариациям давления, зарегистрированным с 3 апреля 2011г. по 15 июня 2012г. В результате анализа экспериментальных данных было выявлено три типа возмущений электрического поля. Одновременно с выделенными типами возмущений электрического поля анализировались возмущения микровариаций давления.

*Возмущения электрического поля первого типа.* Серия однополярных положительных импульсов практически одинаковой амплитуды и длительностью 3-5с (обозначим их как возмущения первого типа) наблюдалась примерно за сутки и закончилась за 40 мин до землетрясения, при этом частота излучения импульсов резко возросла перед началом землетрясения (рисунке 6).



Штриховая линия- день землетрясения 1 мая 2011г; черные сплошные линии – количество импульсов за сутки, красная линия – количество афтершоков с магнитудой от 2 до 7 в очаге за сутки.

Рисунок 6 – Количество зарегистрированных однополярных положительных импульсов за сутки в различные месяцы 2011 и афтершоковая активность

На рисунке представлены результаты выделения этих импульсов за выбранный интервал, а также показана афтершоковая активность.

Согласно сейсмологическому бюллетеню Национального ядерного центра Республики Казахстан (НЯЦ РК) [8] «афтершоковая активизация происходила в компактном объеме геологической среды изометричной формы, со всех сторон ограниченном разломами высокого порядка, субпараллельными и секущими Капчагай-Чиликский сдвиг. Линейные размеры основного облака афтершоков в плане составляют 10 км x 10 км». Афтершоки, показанные на рисунке 5, выбраны примерно в указанной области, ограниченной координатами по широте [43.57°-43.72°СШ] и по долготе [77.65°-77.78°ВД]. Из рисунка видно, что выделенный тип электрических импульсов наблюдался, по крайней мере, начиная с апреля по ноябрь 2011г, при этом их количество, начиная с августа, резко уменьшилось: в сентябре и октябре не было ни одного импульса, а в ноябре наблюдался лишь один импульс. Начиная с декабря 2011г. по 15 июня 2012 г., данный тип импульсов зарегистрирован не был.

Присутствие однополярных положительных импульсов в весенний период 2011г. и их отсутствие в соответствующий период 2012г. вероятно указывает на отсутствие сезонной зависимости появления электрических импульсов.

Появление импульсов также не зависит от времени суток, и их нельзя связывать с грозовой активностью. Например, значительный рост количества импульсов перед землетрясением 30 апреля 2011 г. происходил в ясный день. Отдельного внимания заслуживают результаты наблюдения 28 июня 2011 г., когда за день было зарегистрировано 207 импульсов. Суточная запись электрического поля и микровариаций давления за этот день представлена на рисунке 7.

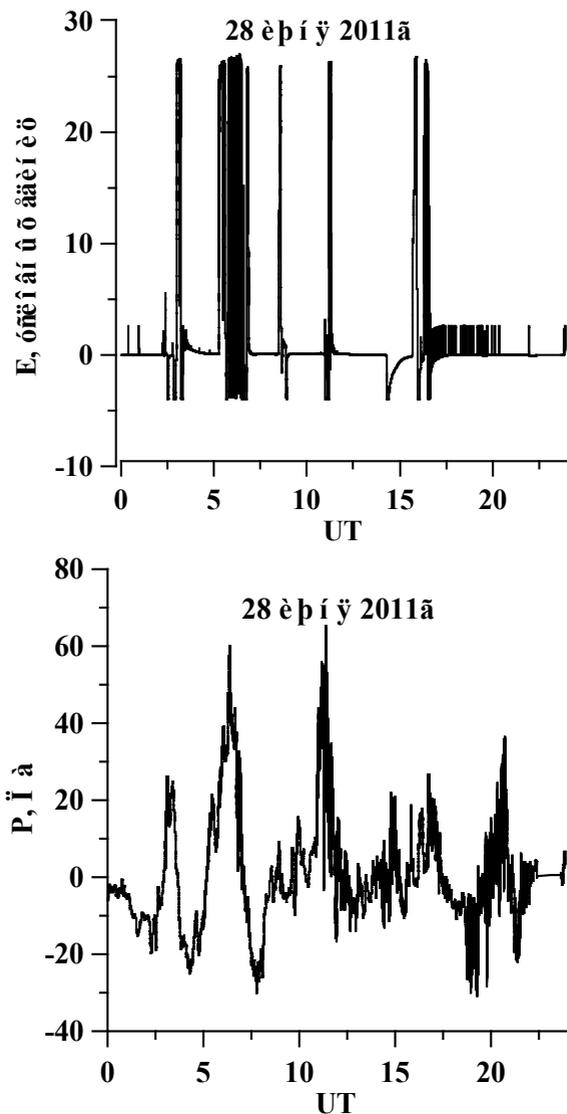


Рисунок 7 – Суточные записи электрического поля и микровариаций давления 28 июня 2011г.

Видно, что самые большие выбросы электрического поля в ряде случаев примерно совпадают по времени с пиками давления, что может быть обусловлено прохождением заряженного облака над радиополигоном «Орбита». Импульсы первого типа наблюдаются в интервале с 0 до 2ч и примерно с 16ч до конца дня. В это время на записях микровариаций давления не отмечается никаких особенностей, которые можно было бы связать с появлением данных импульсов.

Проведенные эксперименты не позволяют пока однозначно связать выделенные электрические импульсы с процессами, происходящими в очаге землетрясения. Однако очевидно, что процесс их генерации начался за несколько дней до рассматриваемого землетрясения, а закончился на месяц позже афтершоков с магнитудой 2-7.

*Возмущения электрического поля второго типа.* Выделен двухполярный импульс электрического поля длительностью 1 ч 40 мин (рисунок 8) за ~18,5 часов до землетрясения 30 апреля 2011г. Амплитуда положительного импульса составила около восьми условных единиц, а отрицательного - около четырех. С помощью разработанной компьютерной программы был проведен поиск импульсов с подобными параметрами амплитуды и длительности, а также с одновременным расчетом коэффициента корреляции между исходным и вновь обнаруженными импульсами.

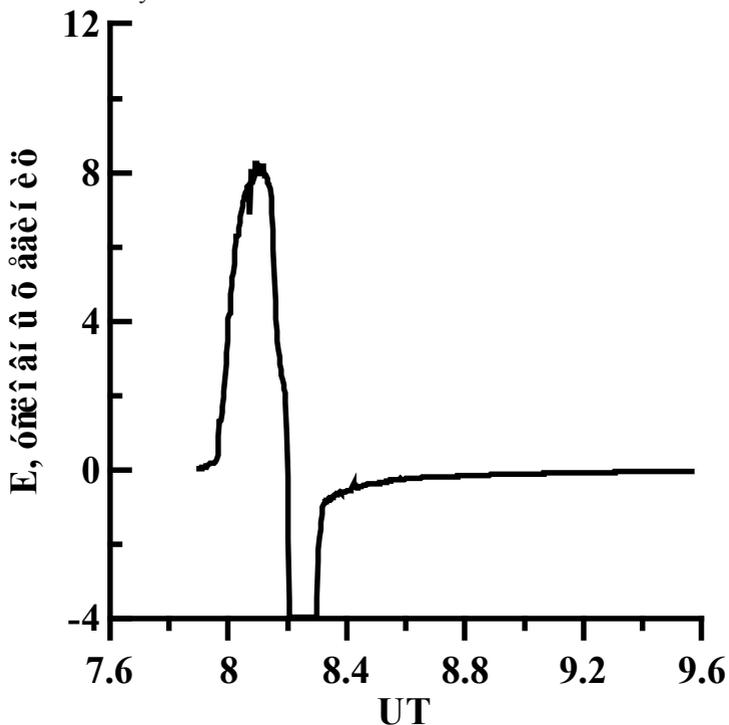


Рисунок 8 – Двухполярный импульс электрического поля, зарегистрированный 30 апреля 2011г.

Анализ суточных данных проведен за период с 5 апреля 2011г. по 15 июня 2012г. На рисунке 9 представлен график изменения величины коэффициента корреляции в зависимости от дня года.

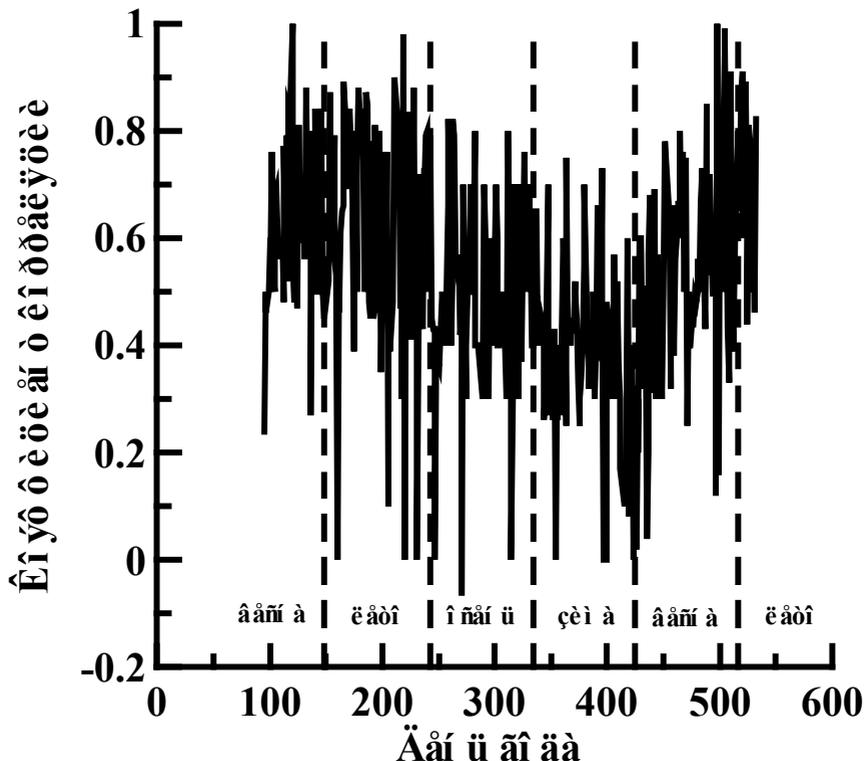


Рисунок 9 – Величины коэффициента корреляции между исходным и вновь обнаруженными импульсами в зависимости от дня года за период с 5 апреля 2011г. по 15 июня 2012г.

Установлено, что величина коэффициента корреляции имеет сезонную зависимость: максимальные значения приходятся на весну-лето 2011г. и весну-лето 2012 г (рисунок 10). Анализ показал, что количество импульсов также имеет сезонную зависимость. По сравнению с положительными импульсами первого типа длительностью 3-5 с, количество двухполярных импульсов за исследуемый период значительно меньше: всего 13. Несмотря на то, что рассматриваемые импульсы в целом подобны тому, который был зарегистрирован перед землетрясением 30 апреля 2011г., имеются и различия. Например, амплитуда как положительной, так и отрицательной частей всех импульсов в 2-3 раза меньше амплитуды исходного импульса. Кроме того, 2 июля и 20 сентября 2011г. зарегистрировано дополнительное возмущение на положительной части импульса, а 12 мая 2011 г. и 12 мая 2012 г. - на отрицательной.

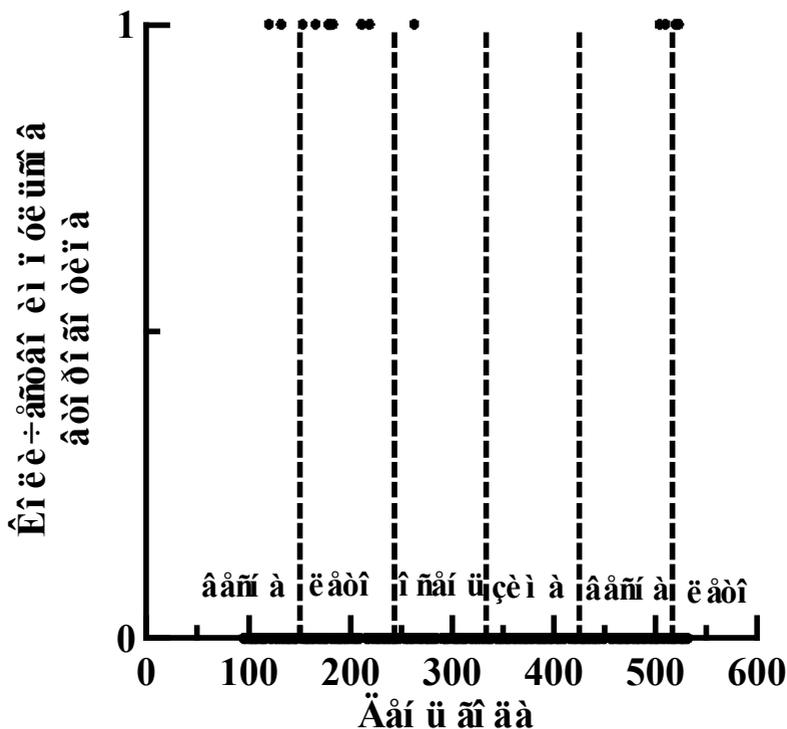


Рисунок 10 – Количество двухполярных импульсов в данных электрического поля в зависимости от дня года с величиной коэффициента корреляции 0.8 и более

Таким образом, амплитуда возмущения второго типа в данных электрического поля, зарегистрированного перед землетрясением, значительно превышает амплитуды подобных возмущений (импульсов), наблюдаемых в течение года после землетрясения. Этим они отличаются от возмущений первого типа, для которых характерно значительно большее постоянство величин амплитуды и длительности.

Для выяснения механизма возникновения рассматриваемых возмущений электрического поля проводился также анализ данных микровариаций давления. Анализ показал, что за исключением записей, полученных 12 мая ( $k=0.7$ ) и 3 июня ( $k=0.64$ ), коэффициенты корреляции между вариациями электрического поля и микровариаций атмосферного давления небольшие, что указывает на отсутствие линейной связи между этими двумя явлениями.

*Возмущения электрического поля третьего типа.* Анализ экспериментальных данных позволил выделить так же третий тип возмущения электрического поля бухтообразной формы длительностью 1 ч 12 мин (рисунок 11), которое началось за 1 ч 43 мин и закончилось за 31 мин до землетрясения, произошедшего 1 мая 2011г.

Видно, что по сравнению с возмущениями первого и второго типов, амплитуда данного возмущения мала (на уровне фона), т.е. находится в пределах сотых долей условных единиц. Анализ суточных данных проведен за период с 5 апреля 2011г. по 15 июня 2012г. Изменение величины коэффициента корреляции в зависимости от дня года представлено на рисунке 12. Из рисунка видно, что, также как и для возмущения второго типа, величина коэффициента корреляции имеет сезонную зависимость, и ее максимальные значения приходятся на весну-лето 2011г. и весну-лето 2012г.

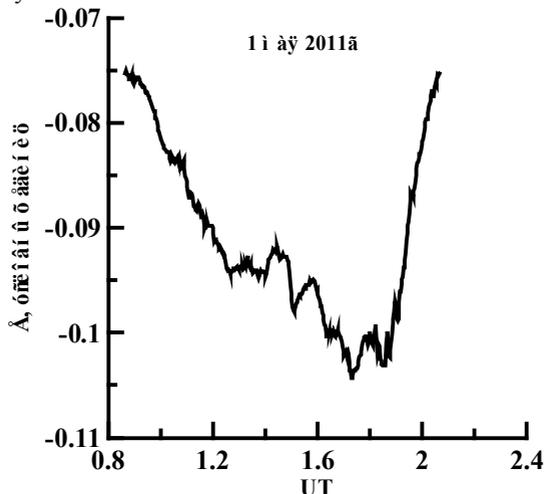


Рисунок 11 – Третий тип возмущения электрического поля

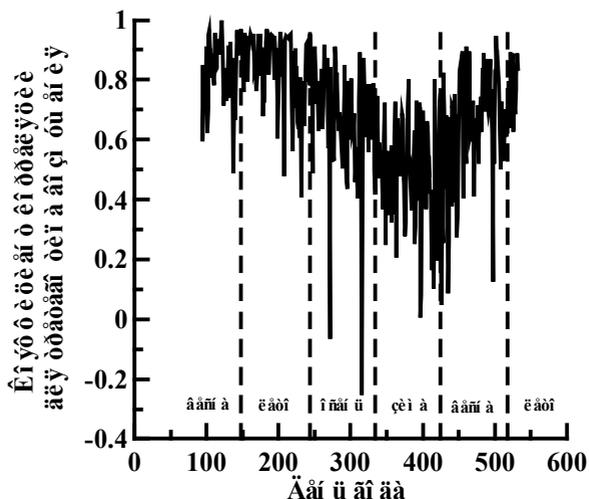


Рисунок 12 – Величины коэффициента корреляции между исходным и вновь обнаруженными бухтообразными возмущениями электрического поля в зависимости от дня года за период с 5 апреля 2011г. по 15 июня 2012г.

Количество возмущений данного типа с коэффициентом корреляции 0.95 и выше за весь период измерений представлено на рисунке 13.

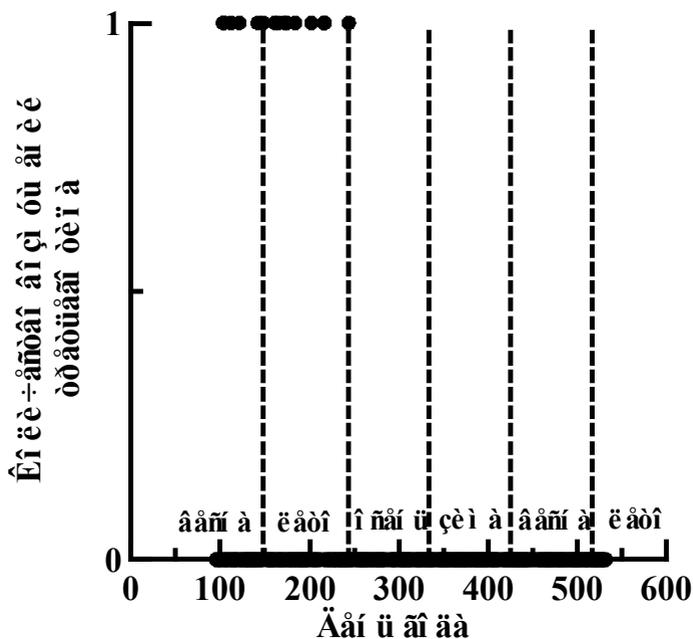


Рисунок 13 – Количество возмущений третьего типа электрического поля, имеющих коэффициенты корреляции 0.95 и более, в зависимости от дня года за период с 5 апреля 2011г. по 15 июня 2012г.

Несмотря на хорошее совпадение по форме, исходное и обнаруженные после землетрясения возмущения имеют различия в знаке и величине электрического поля. Так 22 апреля, 22, 28 мая, 21 июня, 3 и 21 июля 2011г. возмущение было расположено в положительной области, а в остальные дни, также как и перед землетрясением - в отрицательной. При этом амплитуда может превосходить величину бухтообразного возмущения, зарегистрированного перед землетрясением, на порядок. Проведен анализ записей вариаций давления, полученные одновременно с регистрацией возмущений третьего типа, а также коэффициенты корреляции между вариациями электрического поля и давления атмосферы. Обнаружено, что, за исключением 13 апреля ( $k=0.67$ ), 28 мая ( $k=0.63$ ) и 10 июня ( $k=0.66$ ), коэффициенты корреляции между возмущениями электрического поля третьего типа и микровариациями давления небольшие. Это указывает на отсутствие линейной связи между этими двумя явлениями.

Анализ литературных данных [9] показал, что регистрируемые перед землетрясениями на фоне нормального или близкого к нему атмосферного электрического поля аномалии E по форме можно разделить на два основных типа.

Аномалии первого типа имеют бухтообразную отрицательную форму, а второго - форму пакета колебаний с некоторым набором частот. Предложены следующие механизмы образования этих аномалий: квазистатический газоэлектрический и динамический механоэлектрический. Первый механизм связан с увеличением содержания в приземном воздухе основного естественного ионизатора  $^{222}\text{Rn}$  в результате увеличения его потока с поверхности Земли и возникновением известного в атмосферном электричестве явления образования отрицательного объемного электрического заряда («реверс электродного эффекта»). Таким образом, отрицательное бухтообразной формы возмущение электрического поля, наблюдаемое перед Капчагайским землетрясением, является еще одним подтверждением возможной связи между сейсмическими процессами и возмущениями электрического поля.

### **Заключение**

Проведенные эксперименты по регистрации атмосферных микропульсаций и вариаций электрического поля свидетельствуют о взаимосвязи этих параметров с динамическими процессами в атмосфере и земной коре. Атмосферные процессы связаны с наличием регулярных и нерегулярных источников возмущений, как в самой атмосфере, так и в земной коре.

Анализ поведения регистрируемых параметров перед землетрясениями и во время землетрясений позволил установить существование характерных особенностей в микровариациях давления и в вариациях электрических полей. Это может свидетельствовать о существовании предвестников землетрясений и возможности краткосрочного прогноза катастрофических событий. Для реализации этой возможности начаты исследования фоновых характеристик возмущений в конкретном пункте наблюдений с целью распознавания сигнала, природа которого связана землетрясениями. Кроме того продолжают изучение особенностей распространения сигнала от землетрясений в зависимости от его характеристик.

Проведенные нами исследования свидетельствуют о целесообразности проведения комплексных исследований как можно более широкого многообразия параметров атмосферы, таких как микропульсация давления, электрическое поле, температура, скорость ветра, космические лучи и т.п. Это обусловлено тем, что земная кора-атмосфера являются открытой самосогласованной системой, в которой все динамические процессы взаимозависимы. При этом важно найти именно тот параметр, который наиболее адекватно характеризует отклик на то или иное геофизическое событие.

Работа выполнена по РБП 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» в рамках темы «Исследовать взаимосвязь динамических процессов в атмосфере с процессами естественного и антропогенного происхождения на Земле».

### Список литературы

- [1] *Виноградов Ю.А.* Инфразвуковой метод мониторинга природной среды.// Сборник тезисов докладов Второй региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» - 2009 г. – С. 56.
- [2] *Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере.– 1978.– М, Мир.– 531с.
- [3] *Чунчузов И. П., Отрезов А. И., Фирстов П. П.* Экспериментальное исследование внутренних гравитационных волн в горной местности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1999.– Т.27.– №4.– С. 362-368.
- [4] *Сомников В. М.* Солнечный терминатор и динамические явления в атмосфере. Обзор// Геомагнетизм и Аэрономия.– 2011.– Т.51.– № 6.– С. 723–735.
- [5] *Johnston M. J. S.* Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity.// *Surveys in Geophysics* – 1997 – V.18. – P. 441–475.
- [6] *Курскеев А.К.* Землетрясения и сейсмическая безопасность Казахстана. – Алматы: «Энергия».– 2004.– С. 501.
- [7] *Molchanov O., Rozhnoi A., Solovieva M., Akentieva O., Berthelier J.J., Parrot M., Lefeure F., Biagi P.F., Castellana L., and Hayakawa M.* Global diagnostics of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio signals collected on the DEMETER satellite// *Natural Hazards and Earth System Sciences.*– 2006.– N 6.– P. 745-753.
- [8] <http://ns.kndc.kz/rus/index.php>
- [9] *Руленко О. П.* Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы.// *Вулканология и сейсмология.*– 2000.– № 4.– С. 57-68.

## 2.5 ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ОШИБОК МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЕМНИКА СИГНАЛОВ GPS

*Яковец А.Ф., Водяников В.В., Гордиенко Г.И.*

ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ»

Функционирование современных систем навигации (GPS/GLONASS) в значительной мере зависит от состояния околоземного космического пространства, поэтому большое внимание уделяется определению их надежности и помехозащищенности при эксплуатации в условиях спокойной и возмущенной космической погоды. Ухудшение качества функционирования навигационных систем происходит из-за возникновения ионосферных скинтилляций (мерцаний) спутниковых сигналов, обусловленных мелкомасштабными ионосферными неоднородностями.

Ранее считалось, что образование мелкомасштабных ионосферных неоднородностей характерно для авроральной [1] и экваториальной широт [2]. Однако авторы работы [3] наблюдали сильные мерцания сигнала L1 GPS на средних широтах во время большой магнитной бури. Авторы связали появление мерцаний с образованием возмущений на границе главного ионосферного провала. Поэтому представляет значительный интерес изучение широтной зависимости ошибок местоопределения приемника сигналов GPS. Текущие определения местоположения приемников, представленных в глобальной сети станций GPS, рассчитывались с использованием пакета программ, разработанных в Лаборатории Космоса и Геофизики Техасского Университета, США, представленного для свободного пользования в Интернете [4, 5]. Пользователи GPS работают на машинах с разной компьютерной архитектурой и разными операционными системами. Именно поэтому пакет GPSTk разработан таким образом, чтобы быть как можно менее зависимым от платформы. Кроссплатформенность реализуется при помощи использования стандартизированного ISO языка программирования C++. В исходных кодах проекта GPSTk активно используются принципы объектно-ориентированного программирования для обеспечения универсальности, расширяемости и сопровождения продукта. Пакет GPSTk состоит из библиотеки ядра, дополнительных библиотек и набора приложений. GPSTk предлагает целый набор функций, позволяющих заняться решением многих типовых задач, связанных с GPS, например, обработку или использование стандартных форматов, таких как RINEX файлы.

Исследование широтной зависимости ошибок местоопределения мы провели во время большой магнитной бури 15 декабря 2006 г., выбрав три станции, одна из которых расположена вблизи полярной зоны (Анкоридж, 61.2°N, 149.9°W), другая – на средних широтах (Сиэтл, 47.6°N, 122.3°W), и на экваторе (Богота, 4.5°N, 74.1°W). Магнитная буря явилась последствием выброса корональной массы Солнца 13 декабря. Изменения скорости солнечного ветра, межпланетного магнитного поля (IMF)  $B_z$  и  $D_{st}$  индекса представлены на рисунке. 1. Измерения

солнечного ветра и IMF были сделаны на спутнике WIND. Внезапное увеличение скорости солнечного ветра имело место около 14:00 мирового времени (UT) 14 декабря, отражая приход ударной волны. Внезапное начало магнитной бури (SSC) имело место в 14:14 UT 14 декабря (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpSSC.html>). За внезапным возрастанием скорости солнечного ветра следовало его плавное уменьшение. После момента внезапного начала бури начались быстрые осцилляции  $B_z$  компоненты, которые продолжались в течение нескольких часов, а затем около 23:00 UT она повернулась на север на несколько часов и затем окончательно повернулась на юг около 23:00 UT. Вслед за поворотом на юг межпланетного магнитного поля  $D_{st}$  индекс быстро уменьшился, достигнув минимальной величины ( $-147$  нТ) в 08:00 UT.

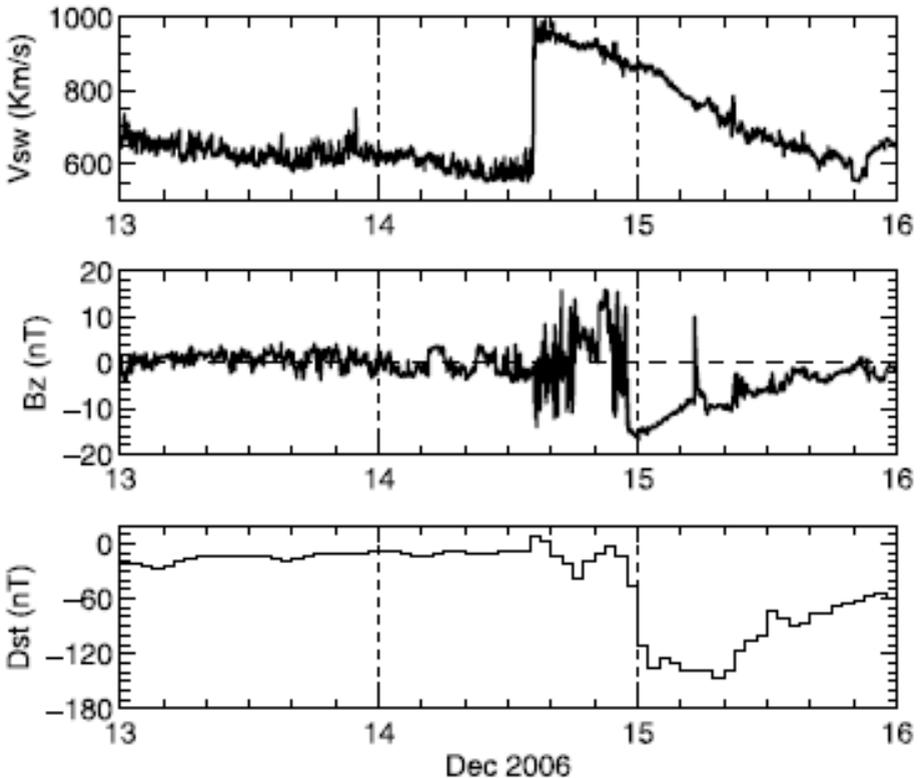


Рисунок 1 – Поведение скорости солнечного ветра ( $V_{sw}$ ) межпланетного магнитного поля ( $B_z$ ) и геомагнитного  $D_{st}$  индекса с 13 по 15 декабря 2006 г.

Рассчитанные вариации текущих координат приемников GPS, установленных на станциях Анкориджа, Сиэтла и Боготы за 15 декабря 2006 г представлены на рисунках 2, 3 и 4 соответственно. Для расчета использованы параметры, представленные в RINEX файлах, помещаемых в Интернете (например, <ftp://>

lox.ucsd.edu/pub/rinex/). Результаты представлены в декартовой геоцентрической системе координат (ECEF) по осям X, Y и Z. Здесь, ось Z направлена вдоль оси вращения Земли к Северному полюсу, ось X лежит в плоскости экватора и направлена в точку пересечения экватора с гринвичским меридианом, ось Y расположена в плоскости экватора под углом  $90^{\circ}$  к востоку от оси X.

На рисунках стрелками отмечено время достижения максимального развития бури, когда Dst упало до - 147 nT, после чего началась фаза восстановления. Рассмотрим поведение рассчитанных координат GPS приемников, характеризующее временной ход ошибки местоопределения приемника. Начнем со станции Анкоридж (рис. 2). Будем оценивать максимальный размах вариаций (MP) координат. До начала бури MP для X, Y, Z составлял ~ 4 м, 4 м и 10 м соответственно. Через некоторое время после момента достижения Dst минимального значения в 08.00 UT начинается увеличение размаха вариаций (уменьшение точности определения) координат до величин ~ 7 м, 7 м и 20 м для X, Y, Z соответственно. Увеличение размаха началось спустя ~ 2 часа после 08.00 UT. Видно, что вариации координат с увеличенным размахом имеют квазипериодическую форму, закончившуюся в ~ 20.00 UT. Дальнейшие вариации, продолжающиеся 16 декабря (не показанные в работе), имели слегка увеличенный размах, по сравнению с вариациями до начала бури.

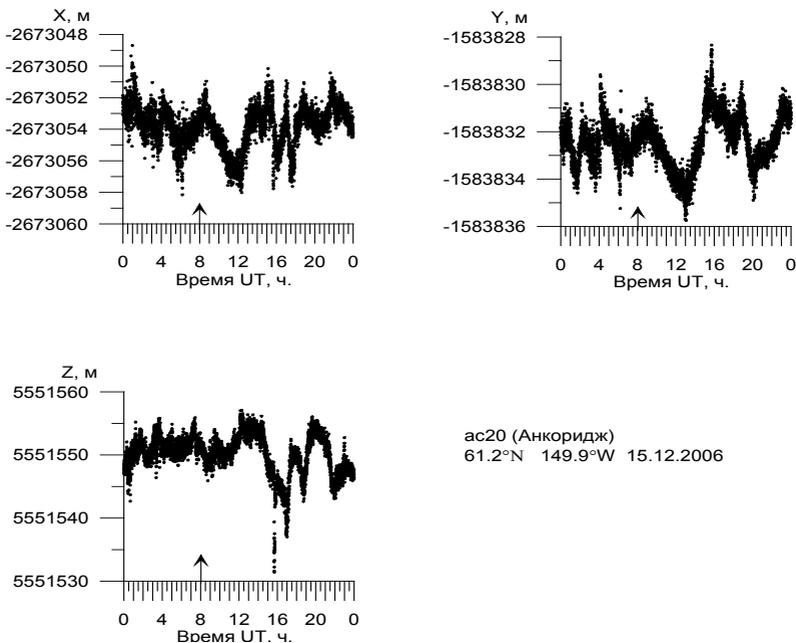
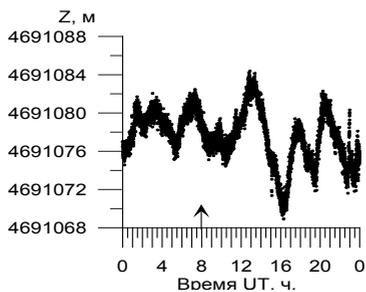
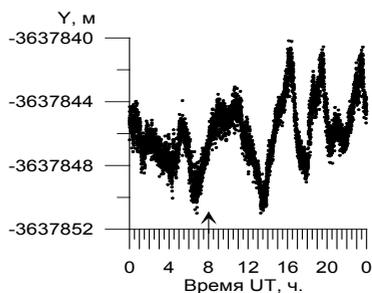
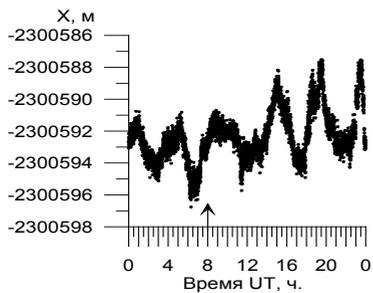
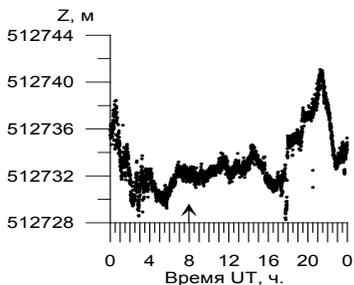
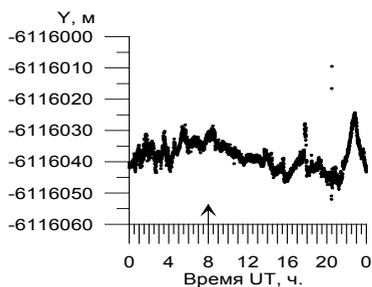
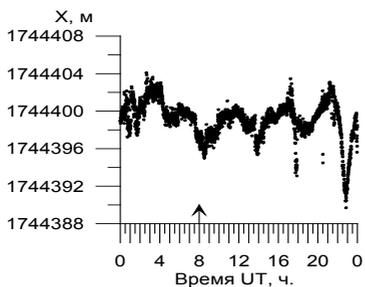


Рисунок 2 – Рассчитанные вариации текущих координат приемника GPS, установленного в Анкоридже за 15 декабря 2006 г.



seat (Сиэтл)  
47.6°N 122.3°W 15.12.2006

Рисунок 3 – Рассчитанные вариации текущих координат приемника GPS, установленного в Сиэтле за 15 декабря 2006 г.



bogt (Богота)  
4.5°N 74.1°W 15.12.2006

Рисунок 4 – Рассчитанные вариации текущих координат приемника GPS, установленного в Боготе за 15 декабря 2006 г.

Для среднеширотной станции Сизтл (рисунок 3) до начала бури МР для X, Y, Z составлял ~ 5 м, 4 м и 5 м соответственно. После достижения Dst минимального значения в 08.00 UT начинается увеличение размаха вариаций (уменьшение точности определения) координат до величин 8 м, 10 м и 20 м для X, Y, Z соответственно. При этом увеличение размаха началось позже, по сравнению с Анкориджем, - спустя ~ 4 часа после 08.00 UT. Видно, что вариации координат с увеличенным размахом имеют квазипериодическую форму, закончившуюся в ~ 22.00 UT. Дальнейшие вариации, продолжающиеся 16 декабря, имели слегка увеличенный размах, по сравнению с вариациями до начала бури.

Для приэкваториальной станции Богота (рисунок 4) до начала бури МР для X, Y, Z составлял ~ 6 м, 15 м и 4 м соответственно. После достижения Dst минимального значения в 08.00 UT начинается увеличение размаха вариаций (уменьшение точности определения) координат до величин 14 м, 27 м и 12 м для X, Y, Z соответственно. При этом увеличение размаха началось позже, по сравнению с Анкориджем и Сизтлом, - спустя ~ 14 часов после 08.00 UT. Видно, что вариации координат с увеличенным размахом имеют импульсную форму, закончившуюся в ~ 24.00 UT. Дальнейшие вариации, продолжающиеся 16 декабря, имели примерно такой же размах, как и вариации до начала бури.

Таким образом, сильная геомагнитная буря является причиной усиления возмущения ионосферы, приводящей к ухудшению точности определения координат приемника, примерно в два раза по сравнению с точностью при спокойных геомагнитных условиях. При этом начало усиления возмущения ионосферы наступает последовательно на станциях, расположенных на разных удалениях от полярных широт. Этот факт позволяет сделать вывод о существовании некоторого механизма переноса возмущений от полярных к экваториальным широтам.

### Список литературы

- [1] *Basu S., MacKenzie E., Whitney H. E.* Morphology of phase and intensity scintillations in the auroral oval and polar cap. *Radio Sci.*, 1985, V.20, № 3, P. 347–356.
- [2] *Kintner P.M., Ledvina B.M., and de Paula E.R.* GPS and ionospheric scintillations. *SPACE WEATHER*, VOL. 5, S09003, doi:10.1029/2006SW000260, 2007.
- [3] *Ledvina B.M., Makela J.J., Kintner P.M.* First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitude. *Geophys. Res. Letters*, 2002, V.29, № 14, 10.1029.
- [4] ARL (2010) The GPS Toolkit, GPSTk [Online; accessed November 20th, 2010]. <http://www.gpstk.org/>
- [5] *Dagoberto Salazar, Manuel Hernandez-Pajares, Jose M. Juan and Jaime Sanz.* GNSS data management and processing with the GPSTk. *GPS Solutions* Volume 14, Number 3, 293-299, DOI: 10.1007/s10291-009-0149-9

## **Раздел 3. Космические технологии в исследованиях экологии Казахстана**

### **3.1 РАЗВИТИЕ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В КАЗАХСТАНЕ**

*Абсаметов М.К., Шагарова Л.В.*

ДТОО «Институт космических исследований имени академика У.М. Султангазина» АО «НЦКИТ»

Президент Республики Казахстан Н.А.Назарбаев в своем Послании народу Казахстана 14 декабря 2012 года «Стратегия «Казахстан – 2050»: новый политический курс состоявшегося государства» отметил: «К 2030 году Казахстан должен расширить свою нишу на мировом рынке космических услуг и довести до логического завершения ряд начатых проектов ... космическую систему дистанционного зондирования, национальную систему космического мониторинга и наземной инфраструктуры ...» [1].

Работы по исследованию Земли из космоса, средств, методов и технологий космического мониторинга ведутся в Институте космических исследований со дня его основания. Основная цель этих работ - изучение состояния природно-хозяйственных комплексов и экосистем на территории республики, прогноз их динамики и разработка научно- обоснованных рекомендаций по устойчивому развитию и рациональному природопользованию. Первоначально эти работы носили поисковый характер и осуществлялись в рамках программ фундаментальных исследований под научным руководством академика У.М.Султангазина, уделявшего большое внимание решению теоретических, технических и организационных вопросов создания системы экологического и природно-ресурсного мониторинга территории республики.

Большое влияние на развитие средств и систем космического мониторинга в Казахстане оказала реализация Государственной программы развития космической деятельности в Республике Казахстан на 2005-2007 годы. В соответствии с планом мероприятий по реализации Госпрограммы Институтом космических исследований был создан наземный комплекс приема данных дистанционного зондирования на основе малых антенных систем Унискан-24.

В Государственной программе по форсированному индустриально-инновационному развитию Республики Казахстан на 2010-2014 годы одной из стратегических задач является создание полноценной космической отрасли как наукоемкого и высокотехнологичного сектора экономики, способствующего ускорению индустриально-инновационного развития республики, укреплению национальной безопасности и обороны, развитию науки и высоких технологий. Для выполнения данной задачи программой предусматривается развитие Национальной системы космического мониторинга (НСКМ) для удовлетворения

спроса на внутреннем и внешнем рынках данных дистанционного зондирования земли с высоким уровнем обработки. Для этого в Программе по развитию космической деятельности в Республике Казахстан на 2010–2014 годы поставлены задачи по созданию целевых космических систем ДЗЗ и развитию технологий приема, архивации, обработки и отображения данных ДЗЗ. Так, наземная инфраструктура НСКМ включает сеть станций приема, обработки и архивации данных ДЗЗ в г.Астана и г.Алматы [2]. Информация по комплектации Центра приема космической информации и фактические характеристики станций по результатам их технического обследования приведены в таблицах 1 и 2.

Месторасположение	г. Алматы	г. Астана
Тип станции приема данных ДЗЗ (фирма изготовитель)	АПК Унискан-24 (ООО «ИТЦ «СканЭкс»)	АПК Унискан-36 (ООО «ИТЦ «СканЭкс»)
Дата установки станции	2001 год	2003 год
Дата последней модернизации	2011 год	2005 год
Сертификация	С е р т и ф и ц и р о в а н технологический комплекс приема и обработки данных RESOURCESAT-1	С е р т и ф и ц и р о в а н технологический комплекс приема и обработки данных RADARSAT-1
Прием данных в 2013 г.:	Terra/MODIS, Aqua/MODIS, SuomiNPP	Terra/MODIS, Aqua/MODIS, RADARSAT-1

Таблица 1 - Комплектация Центра приема данных ДЗЗ

Наименование параметра	Унискан-36	Унискан-24
Диаметр зеркала антенны, м	2.4	2.4
Диапазон рабочих частот, ГГц	8.0-8.4	8.0-8.4
Тип поляризации	правая круговая	правая круговая
Шумовая температура МШУ, К, не более	60	60
Коэффициент усиления МШУ, дБ, не менее	65	65
Неравномерность коэффициента усиления МШУ, дБ, не более	1.5	1.5
Пределы углов наведения, град		
- по азимуту	-108 +212	-
- по углу места	0...178	0...180
- по оси наклона	-20...+20	-90...+90
Скорости наведения, град/с по азимуту по углу места	Az – 3.1 El – 2.7 Tilt – 2.4	3 3
Динамическая ошибка сопровождения, мин.	4	4
Вид модуляции	ФМ-2, ФМ-4, ФМ-4С	ФМ-2,ФМ-4,ФМ-4С
Темп входного потока, Мбит/с	до 110	до 170

Таблица 2 - Технические характеристики станций Унискан

Станции Унискан оснащены приёмно-обрабатывающими трактами, которые представляют собой систему выделения полезного сигнала и трансформации его в вид, достаточный для дальнейшей обработки программными средствами.

Применение разных методов кодировки сигнала определяется коммерческими целями производителя КА, а именно продажей годовых лицензий на право получения данных с борта КА.

В результате обработки и архивации принятой информации создан архив цифровых космических изображений территории Казахстана. Архив пополнен также космическими снимками Landsat в объеме 1705 Гб, переданными United States Department of the Interior U.S. Geological Survey в мае 2010 года в рамках мероприятия по распространению данных Landsat в международное научное сообщество Азиатско-Индонезийских стран. Объемы заархивированных данных ДЗЗ приведены в таблице 3.

Наименование КА	Дата начала сбора данных	Дата окончания	Объем архива (GB)
TERRA/Modis	28.02.2001	По настоящее время	11816
AQUA/Modis	17.12.2004	По настоящее время	3989
METEOR-3M	20.08.2002	07.03.2006	515
IRS-1C, 1D	LISS	13.01.2004	18.06.2009
	PAN	13.01.2004	28.06.2009
IRS P6 LISS3	30.05.2006	14.06.2010	436
IRS P6 LISS4	20.07.2006	04.06.2010	252
RADARSAT-1	23.02.2005	30.03.2013	663

Таблица 3 - Объемы архивированных данных ДЗЗ

Общий объем архивных данных ДЗЗ составляет более 20 ТБ. С увеличением радиометрического и пространственного разрешений целевой аппаратуры съемки Земли увеличился и объем передаваемых со спутника данных за один сеанс. Информация об использовании носителей для долговременного архива представлена в таблице 4. Использование более емких накопителей информации приводит как к уменьшению количества дисков, так и к уменьшению материальных затрат, связанных с их хранением.

Носители информации	CD	DVD	BD
Объем	700 Мб	4,7 Гб	25 Гб

Таблица 4 - Использование носителей информации для архивирования данных ДЗЗ

Для поиска данных в архиве все носители информации имеют соответствующую маркировку, позволяющую однозначно выявить искомым космический снимок. Для автоматизации процесса записи снимков и создания маркировочных обложек применяется роботизированное устройство Primera Bravo, совмещающее в себе привод записи дисков и печатающий механизм.

Для привлечения новых потребителей обеспечен доступ к геопорталу результатов космического мониторинга территории РК и к каталогам [<http://eostation.gzi.kz>, <http://catalog.gzi.kz>, <http://landsat.gzi.kz>.]

Современные высокопроизводительные космические системы ДЗЗ регулярно

пополняются новыми КА, которые имеют улучшенные характеристики целевой аппаратуры и высокую скорость передачи данных. В ближайшие 10 лет различные операторы из 40 стран планируют вывести на околоземную орбиту почти 300 спутников ДЗЗ.

Среди современных космических спутников, представляющих снимки среднего и высокого разрешения, можно выделить лишь ряд спутников, которые обеспечат преемственность технологических решений и совместимость с архивными данными, тем самым позволят сопоставить данные ДЗЗ во временном диапазоне: RESOURCECAT-1 и RESOURCESAT-2, Landsat и UK-DMC2 (аналог Landsat по спектральным характеристикам), Radarsat-1 и Radarsat-2.

В таблице 5 приведены сравнительные характеристики КА UK-DMC2 и Landsat.

При одинаковых спектральных характеристиках у радиометра UK-DMC2 лучше пространственное разрешение (22 м вместо 30 м), больше ширина съемки (до 600 км), «выше или равно» радиометрическое разрешение (8 или 10 бит вместо 8 бит).

Характеристики	UK-DMC2 SLIM-6	Landsat-7 ETM+
Пространственное разрешение	22 м	30 м
Соотношение сигнала к шуму	>100:1	>100:1
Радиометрическое разрешение	8 или 10 бит	8 бит
Канал: Ближний инфракрасный (Near IR)	0.77 – 0.90 $\mu\text{m}$	0.77 – 0.90 $\mu\text{m}$
Канал: Красный (Red)	0.63 – 0.69 $\mu\text{m}$	0.63 – 0.69 $\mu\text{m}$
Канал: Зеленый (Green)	0.52 – 0.60 $\mu\text{m}$	0.52 – 0.60 $\mu\text{m}$
Ширина полосы съемки	до 600 км	до 180 км

Таблица 5 - Сравнение характеристик UK-DMC2 и Landsat-7

Среди международных коммерческих радиолокационных аппаратов отметим RADARSAT-2, который является преемником RADARSAT-1, при этом обладает возможностями полной поляриметрической съемки, а также характеризуется стабильным интерферометрическим режимом съемки в С-диапазоне длин волн с широкой полосой захвата, а также великолепным соотношением «пространственное разрешение – площадь сцены». По сравнению со своим предшественником RADARSAT-2 имеет следующие усовершенствования:

- установлен новый радар с активной фазированной антенной решеткой, обеспечивающий съемку с пространственным разрешением 1-3 м;
- реализован режим многополяризационной съемки с сигналами четырех видов поляризации одновременно;
- обеспечена возможность активного зондирования с левой и с правой стороны относительно трассы полета, что позволяет сократить время повторной съемки районов;
- увеличена точность определения орбитального положения и ориентации спутника, что обеспечивает более точную геопривязку изображений.

Многоцелевой спутник Resourcesat-2 с тремя взаимодополняющими сканерами является усовершенствованной версией аппарата Resourcesat-1, имеет такие же спектральные характеристики, и обеспечит преемственность технологических решений, совместимость данных и продуктов их обработки (таблица 6).

Сканер (КА)	LISS-4 RS-1	LISS-4 RS-2	LISS-3 RS-1	LISS-3 RS-2	AWiFS RS-1	AWiFS RS-2
Пространственное разрешение, м	5,8	5,8	23,5	23,5	56	56
Ширина полосы съемки, км	70	70	141	141	740	740
Радиометрическое разрешение, бит	10	10	10	10	10	12
Спектральный диапазон, нм						
Канал: Зеленый (Green)		520-590	520-590	520-590	520-590	520-590
Канал: Красный (Red)		620-680	620-680	620-680	620-680	620-680
Канал: Ближний инфракрасный (Near IR)		770-860	770-860	770-860	770-860	770-860
Средний ИК			1550-1700	1550-1700	1550-1700	1550-1700

Таблица 6- Сравнительные характеристики сканеров, расположенных на RESOURCESAT-1 и RESOURCESAT-2

Космические снимки являются первоочередным материалом, на котором строятся как фундаментальные, так и прикладные исследования. При этом следует отметить, что результатом фундаментальных исследований (10-15% в общем объеме реализации) является отчет о теоретических знаниях и опыте, полученных в ходе обработки снимков ДЗЗ. Результатом прикладных исследований (50-70%) являются тематические карты, которые также составляются на основе данных ДЗЗ. Результатом работ по хоздоговорам (10-20%) также являются тематические карты, основанные на данных ДЗЗ. В настоящее время особо актуальными стали исследования, направленные на прогноз и дальнейшее предотвращение ЧС (пожаров, наводнений, паводков, разрушения гидротехнических сооружений и пр.), мониторинг сельскохозяйственных угодий и пастбищ.

Применение в исследованиях данных ДЗЗ имеет социально-экономическую эффективность:

- мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий и контроль проведения агротехнических работ позволяет повысить эффективность использования земель и уровень жизни населения;
- данные мониторинга чрезвычайных ситуаций необходимо учитывать при планировании развития территорий, принятии решений на строительство промышленных и социальных объектов. Мониторинг чрезвычайных ситуаций позволяет снизить возможный ущерб от пожаров и наводнений, уменьшить масштабы чрезвычайных ситуаций;

- мониторинг лесных ресурсов, позволяющий повысить достоверность оценки состояния лесов для уменьшения эколого-экономического и социального ущерба от воздействий природного и техногенного характера, а также эффективно решать практические задачи в системе управления лесным хозяйством;
- всепогодный космический мониторинг нефтегазовой инфраструктуры, в том числе нефтяных операций в Казахском секторе Северного Каспия, обеспечивающий повышение эффективности принятия решений региональными уполномоченными органами по чрезвычайным ситуациям для планирования мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий катастрофических нефтяных разливов, что, в свою очередь, влияет на безопасность разработки морских нефтяных месторождений и экологию региона;
- картографические работы, позволяющие эффективно использовать результаты космической деятельности в интересах социально-экономического развития, в частности обеспечения современной и объективной картографической и географической информацией для решения различного рода задач;
- применение технологий дистанционного зондирования для детектирования изменений в городской инфраструктуре, позволяющие выявлять объекты несанкционированной застройки, в том числе в заповедных, водоохранных, труднодоступных зонах. Это способствует своевременному принятию мер по ликвидации таких объектов и предотвращению появления новых несанкционированных застроек;
- всепогодный мониторинг трансграничных рек, позволяющий повысить эффективность использования водных объектов, что в значительной степени повлияет на обеспечение населения питьевой водой.

### **Список литературы**

- [1]. Послание Президента Республики Казахстан Н.Назарбаева народу Казахстана. 14 декабря 2012 г.
- [2]. *Стивак Л.Ф., Шагарова Л.В., Бакашева А.У.* Развитие Национальной системы космического мониторинга территории Казахстана // Коллективная монография, Прикладные космические исследования в Казахстане. Алматы, «Дайк-Пресс», 2010. Т.6 - С.13-2

### 3.2 МОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННЫХ СМЕЩЕНИЙ ПОЧВ И ГРУНТОВ МЕТОДАМИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

*Мухамедгалиев А.Ф., Разакова М.Г., Смирнов В.В., Бекмухамедов Б.Э.*

ДТОО “Институт космических исследований имени академика  
У.М. Султангазина” АО «НЦКИТ»

Увеличение разрешающей способности антенн с синтезированной апертурой, установленных на космических аппаратах, вызвало интерес к более детальному использованию результатов, полученных с применением таких антенн для радиолокационного зондирования земли. Комплекс соответствующей аппаратуры называют SAR-системами, по аналогии с космическим сенсором Synthetic aperture radar, установленным на космическом аппарате.

По сравнению с оптико-электронными устройствами, SAR-системы обладают целым рядом преимуществ, главная из которых всепогодность, т.е. возможность наблюдения земной территории в сплошную облачность и даже ночью. Это делает SAR-системы весьма востребованными для оперативного космического мониторинга.

В настоящее время все большее распространение среди космических средств определения вертикальных и горизонтальных перемещений земной поверхности получает радиолокационная интерферометрия, при которой анализируются амплитуда и фаза сигнала, отраженного от поверхности. При этом одно изображение, сделанное с помощью SAR-системы, в большинстве случаев не имеет практического значения, тогда как два одновременных снимка (интерференционная пара) эффективно используются для решения задачи дифференциальной интерферометрии.

Преимущество интерферометрического метода заключается в возможности получать информацию о подвижках земной поверхности для больших территорий (до 3000 кв. км.), а не только в конкретных точках, при измерениях наземными геодезическими приборами. Данный метод эффективен и экономически, так как исключается выполнение дорогостоящих геодезических полевых работ [1]. Периодичность получения радарных данных с космических спутников может колебаться от 11 до 45 дней, в зависимости от типа космического аппарата.

Спутниковая радиолокационная интерферометрия является методом дистанционного зондирования, обеспечивающим высокую точность определения высот и смещений за счет использования фазовой компоненты сигнала.

Каждое радиолокационное изображение содержит амплитудный и фазовый слой. Амплитудный слой, в основном, используется для осуществления географической привязки снимков, а по фазовой компоненте можно получить информацию о произошедших за время между съемками деформационных изменениях исследуемой поверхности. Результирующая фаза  $\Phi$ , полученная в ходе интерферометрической обработки фазовых слоев интерферометрической пары, состоит из следующих компонентов:

$$\Phi = \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{def}} + \Phi_{\text{atm}} + \Phi_{\text{n}}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{\text{topo}}$  — фазовый набег за счет обзора топографии под двумя разными углами;

$\Phi_{\text{def}}$  — фазовый набег за счет смещения поверхности в период между съемками;

$\Phi_{\text{atm}}$  — фазовый набег за счет различия длин оптических путей из-за преломления в среде распространения сигнала;

$\Phi_{\text{n}}$ —вариации фазы в результате электромагнитного шума.

Слагаемое  $\Phi_{\text{def}}$  в выражении (1) не зависит от орбитальных параметров, а определяется только длиной волны и величиной смещения в направлении луча обзора.

Это свойство интерферометрической разности фаз позволяет измерять подвижки земной поверхности на величины, сравнимые с длиной волны радиолокатора, т.е. на сантиметры или даже миллиметры. Для получения абсолютных значений подвижки исследуемого участка земной поверхности необходимо исключить влияние топографической компоненты  $\Phi_{\text{topo}}$  из полной фазы интерферограммы. Из-за необходимости вычитания топографической компоненты из полной фазы интерферограммы для получения величины  $\Phi_{\text{def}}$  этот метод получил название дифференциальной интерферометрии (ДИ).

Методом ДИ можно определять величины смещений земной поверхности путем вычитания из интерферограммы топографической компоненты опорной Цифровой Модели Рельефа (ЦМР). При этом, чем выше точность опорного рельефа по высоте, тем увереннее определяются смещения и отфильтровываются фазовые помехи, повышается когерентность. Для максимально корректного разделения фазы опорного рельефа и фазы смещений земной поверхности необходима ЦМР, наиболее близкая по времени к данным, используемым для интерферометрической обработки. Для построения актуальной на данный момент ЦМР использован метод радарной интерферометрии.

Для отработки технологии обнаружения подвижек земной поверхности методом дифференциальной интерферометрии в качестве тестового участка была выбрана территория корпорации Казахмыс, на которой проводилась интенсивная подземная разработка рудных месторождений, что явилось причиной возникновения деформаций рельефа, просадок и обвалов почвы (рисунок 1). Исследуемая область охватывает четыре планшета стотысячного масштаба.

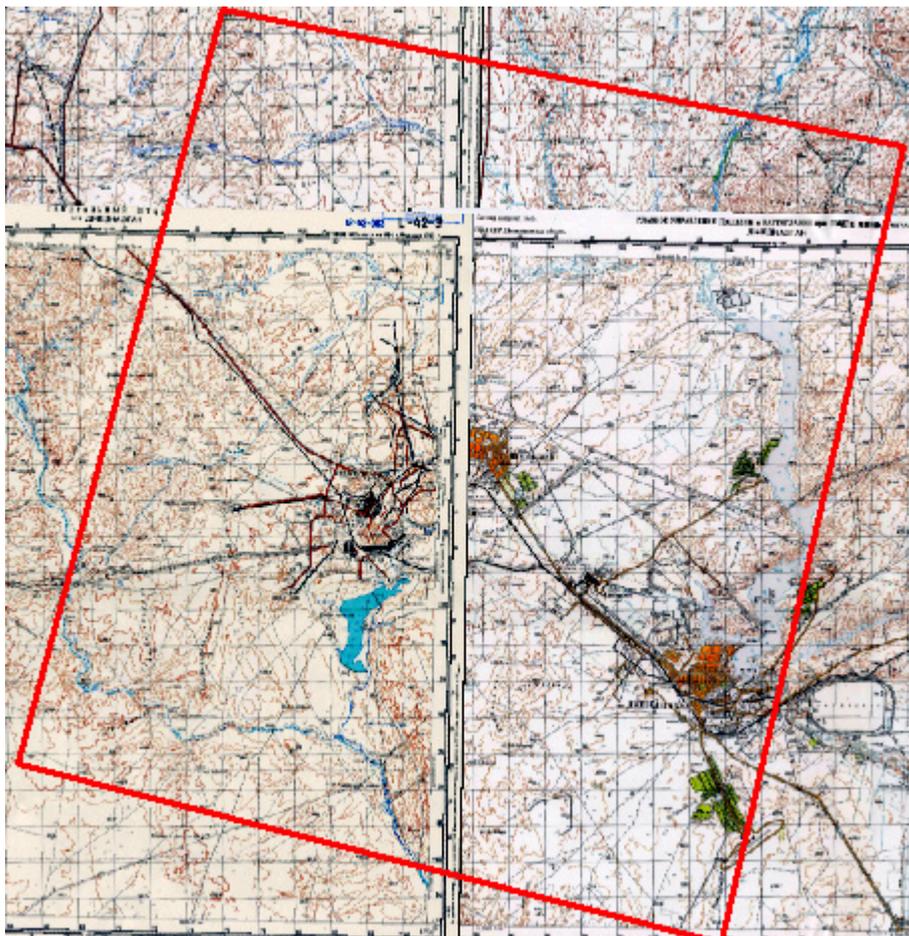


Рисунок 1 - Картограмма тестового участка

На выбранном участке с 70-х годов велись топографо-геодезические работы по наблюдению за оседанием грунта в связи с интенсивной разработкой рудных месторождений [1]. По данным топографо-геодезических измерений по фиксированным реперным точкам тестового участка было выявлено, что скорость оседания грунта в отдельных точках достигает до 1 см в месяц.

В результате проведенного анализа технических характеристик космических систем нового поколения для решения задачи дифференциальной интерферометрии было решено воспользоваться данными, полученными аппаратами Cosmo-SkyMed и TerraSAR-X в различных временных режимах.

Съемка космическим аппаратом Cosmo-SkyMed проводилась с временной базой 16 дней в течение периода весна-лето 2012 года. Положительными факторами

такой съемки являются: получение значительного количества тандемных пар радиолокационных изображений; высокая когерентность; малая декорреляция радиолокационных данных.

Схема покрытия территории тестового участка радиолокационными данными Cosmo-SkyMed изображена на рисунке 2. Даты съемки показаны в таблице 1.

Из многопроходной съемки с космического аппарата TerraSAR-X была выбрана интерферометрическая пара с наименьшей базовой линией. Даты съемки выбранной пары приведены в таблице 2.

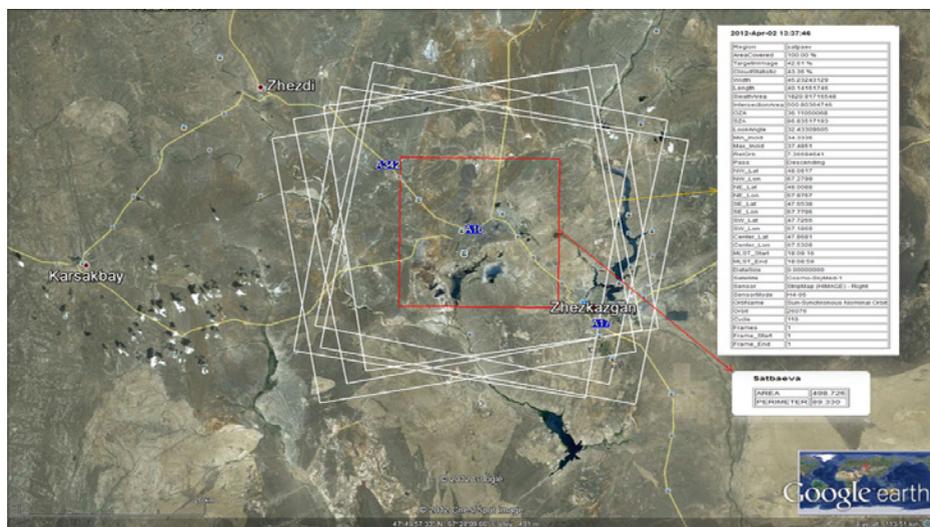


Рисунок 2 - Схема покрытия тестового полигона данными радиолокационного зондирования CosmoSkyMed

Космический аппарат	Дата	Территория
Cosmo-SkyMed	2012 04 06	Сатпаев
Cosmo-SkyMed	2012 04 22	Сатпаев
Cosmo-SkyMed	2012 05 08	Сатпаев
Cosmo-SkyMed	2012 05 24	Сатпаев
Cosmo-SkyMed	2012 06 10	Сатпаев
Cosmo-SkyMed	2012 05 26	Сатпаев

Таблица 1 - Режим многопроходной съемки Cosmo-SkyMed

Космический аппарат	Дата	Территория
TerraSAR-X	2011 10 18	Сатпаев
TerraSAR-X	2012 08 10	Сатпаев

Таблица 2 - Режим съемки TerraSAR-X

Для достижения необходимой точности элементов ЦМР использовалась многопроходная съемка тестового участка с использованием радиолокационных данных космического аппарата COSMO-SkyMed. Из всех заказанных

радарных снимков было выбрано четыре, по которым были построены интерферометрическим методом три ЦМР. Для оптимальности сочетания интерферометрических фаз пары выбирались итерационным методом путем подбора временной и пространственной базы. Следует отметить, что минимальное значение пространственной базы (расстояние между двумя радиолокационными сенсорами) определяло лучшую детальность радиолокационных изображений (рисунок 3).

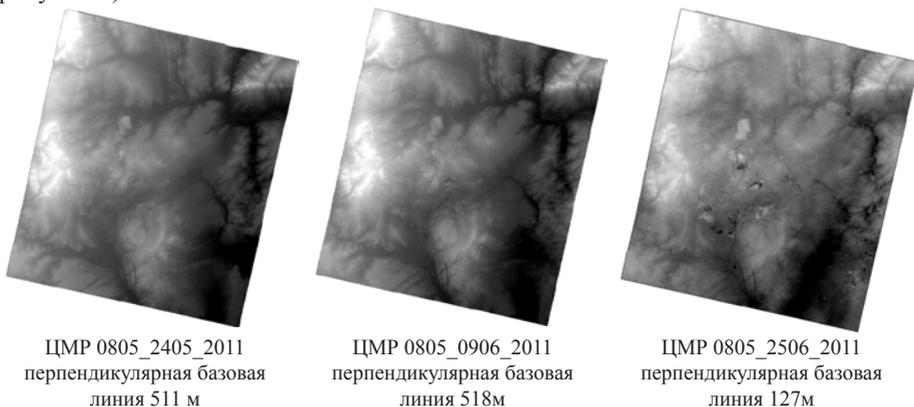


Рисунок 3 - ЦМР, построенные по интерферометрическим парам данных COSMO-SkyMed с разными временными базами

Итоговый рельеф (рисунок 4) был получен усреднением по трем интерферометрическим парам, что значительно повысило точность результирующей ЦМР. Построенная ЦМР была использована для разделения фазы опорного рельефа и фазы смещений земной поверхности с целью получения абсолютных значений смещений земной поверхности на тестовом участке.

Выявление смещений земной поверхности проводилось с использованием радарных снимков с космического аппарата TerraSAR-X с временной базой девять месяцев.

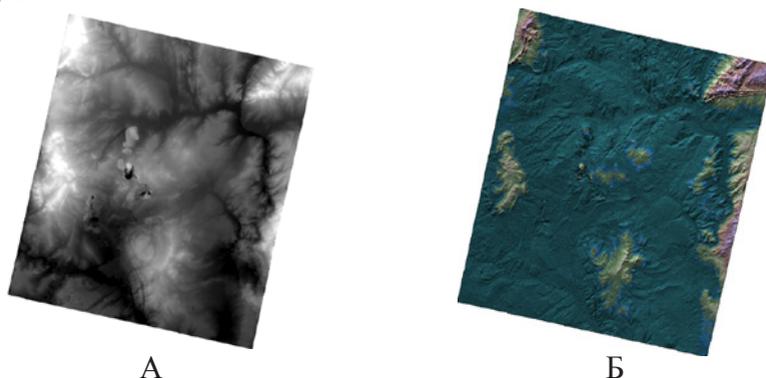


Рисунок 4 - ЦМР, построенные по данным COSMO-SkyMed: А – черно-белая палитра, Б – цветная палитра для лучшего визуального восприятия

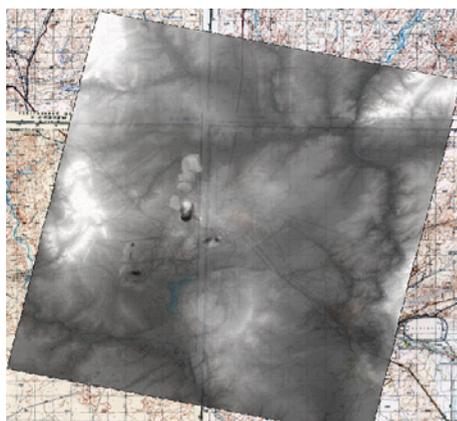
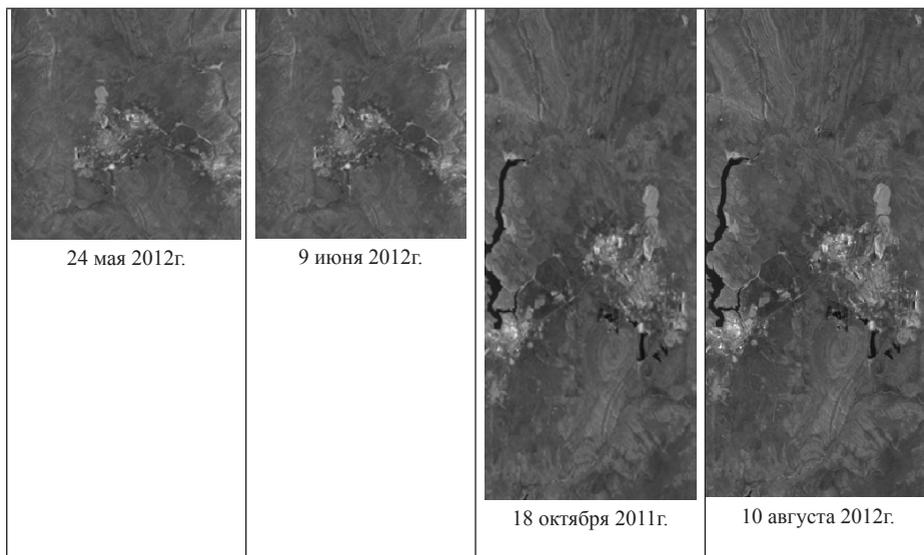
Построенная ЦМР, в плане, практически полностью совпадает с топографической картой масштаба 1:100 000, что говорит о ее высокой точности (рисунок 5).



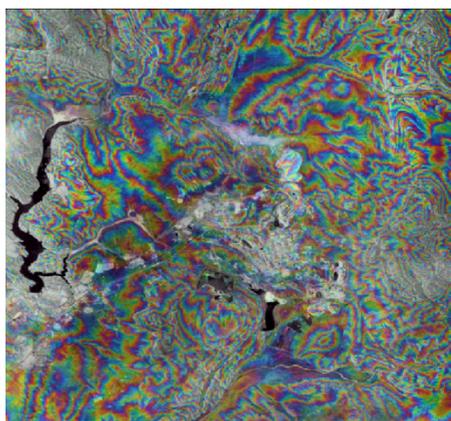
Рисунок 5 - Исследуемая методом интерферометрии область на фоне 100 000 планшетов

Для расчетов была отобрана интерферометрическая пара радиолокационных снимков за 18 октября 2011г. и 10 августа 2012г.

Для мониторинга смещений земной поверхности методами ДИ были получены многопроходные пары радиолокационных космических снимков космических аппаратов Cosmo-SkyMed (5 сцен) и TerraSar - X (5 сцен), по которым были построены ЦМР и интерферограмма (рисунок 6)



ЦМР



Интерферограмма

Рисунок 6 - Генерация ЦМР и интерферограммы

При этом тандемная пара космических снимков космического аппарата (КА) Cosmo-SkyMed с максимальной величиной базовой линии (1031 м.) использовалась для построения цифровой модели рельефа, а тандемная пара КА TerraSar - X с минимальным значением базовой линии (200 м.) - для генерации интерферограммы.

Генерация интерферограммы и построение ЦМР осуществлялись в программном комплексе ERDAS Imagine2011 с использованием модуля InSAR.

Построенная ЦМР послужила основой для разделения фазы опорного

рельефа и фазы смещений земной поверхности с целью получения абсолютных значений смещений земной поверхности на тестовом участке.



Рисунок 7 - Карта смещений земной поверхности на тестовом участке

После проведения операций:

- фильтрации интерферограммы;
- разделения компонентов фазы  $\Phi_{topo}$  и  $\Phi_{def}$ ;
- развертки фазы (процедура перехода от относительных значений фазы к абсолютным величинам смещений),

по полученной интерферограмме построена карта смещений земной поверхности на тестовом участке (рисунок 7). Контуры показывают величины вертикальных смещений в сантиметрах.

Сопоставление результатов проседаний земной поверхности, полученных методом дифференциальной интерферометрии, с данными маркшейдерских измерений за период 1968-2011 гг. по профилю показало достаточно высокую корреляцию. На рисунке 8 приведена схема расположения профиля на результирующей карте смещений, полученной из интерферометрических измерений и величины смещений вдоль этого профиля. По данным интерферометрических измерений в точке репера 27 абсолютная величина просадки земной поверхности с октября 2011г. по август 2012г. составила 0.8 см, а по наземным измерениям это значение равно 1 см.

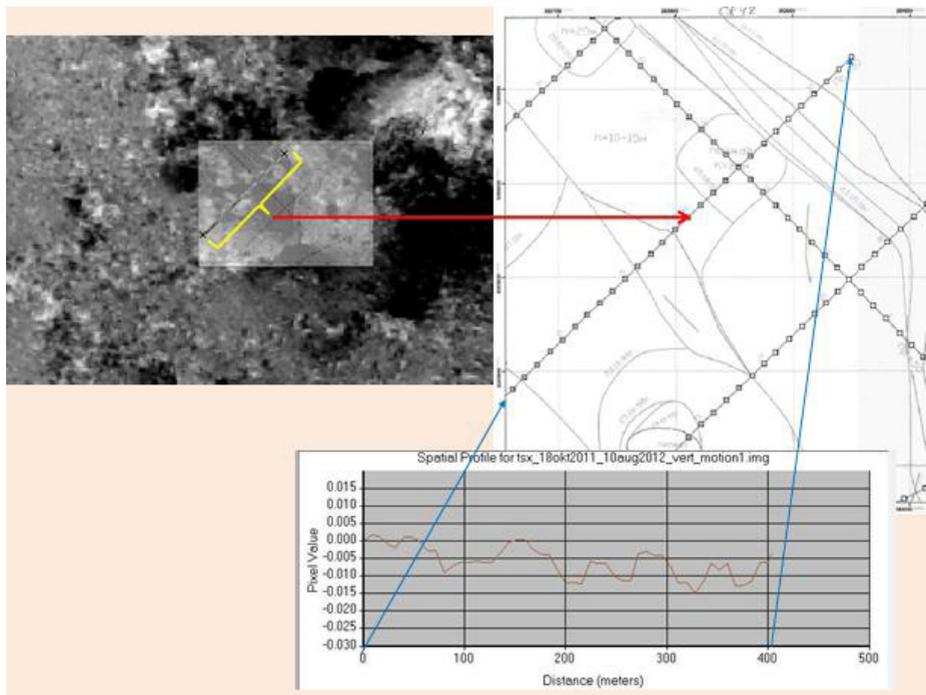


Рисунок 8 - Сопоставление результатов проседаний земной поверхности, полученных методом дифференциальной интерферометрии и наземными измерениями

В заключении отметим, что точность методов дифференциальной интерферометрии для решения задачи мониторинга подвижек земной поверхности зависит от параметров космической съемки. Поэтому необходимо иметь набор не менее чем из пяти снимков для возможности осуществления выбора наиболее коррелирующих между собой снимков.

### Список литературы

- [1] Чернова И.Ю., Нугманов И.И., Лунева О.В., Даутов А.Н., Чернова О.С. Мониторинг смещений земной поверхности на территории юго-востока Республики Татарстан по данным космических радарных съемок // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2012 том 14, №1(9).. С. 2458-2464.
- [2] Мансуров В.А., Сатов М.Ж., Жантүев Р.Т., Кантемиров Ю.И. Космический радарный мониторинг смещений земной поверхности и сооружений на Жезказганском месторождении меди // GEOMATICS. 2012. №1 С. 78-84.

### 3.3 ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

*Мухамедгалиев А.Ф., Разакова М.Г., Смирнов В.В., Айдарханов Е.Е.*

ДТОО “Институт космических исследований имени академика  
У.М. Султангазина” АО «НЦКИТ»

Практика мониторинга технического состояния магистральных трубопроводов показывает, что дефекты на трубопроводах носят, как правило, территориально-распределенный скрытый характер, и обнаружение их при традиционном обследовании территории очень трудоемко, а порой и невозможно.

К сказанному следует добавить, что дефектоскопия магистральных трубопроводов является достаточно дорогостоящим технологическим процессом, часто связанным с проведением больших объемов земляных работ. Поэтому применение геоинформационных технологий дистанционного зондирования для выявления и мониторинга «рисковых зон» на магистральных трубопроводах с целью оптимизации дефектоскопических и ремонтных работ является актуальным. Возникновение и развитие «рисковых участков» на магистральных трубопроводах (МТ), связанных с ускоренным развитием деформационных процессов, как правило, обусловлено происходящими эндогенными и экзогенными геологическими процессами (геодинамических подвижек, пучения грунтов, появления карста и др.), в результате которых трубопроводы подвергаются постоянному напряженно– деформированному воздействию, что отражается на их техническом состоянии. Значительное влияние на развитие коррозионных процессов оказывает геоморфология участка прохождения трубопровода (солончаки, грунтовые воды, др.). Выявление таких процессов и их пространственная локализация наиболее эффективно могут быть осуществлены с использованием космических спектрозональных данных дистанционного зондирования [1].

Существующая практика показала, что лучшие результаты мониторинга технического состояния МТ достигаются при комплексном использовании методов традиционной диагностики и результатов тематической обработки (дешифрирования) спектрозональных данных дистанционного зондирования (ДДЗ).

#### **3.3.1 Комплексный анализ внешних и технологических индикаторов для определения степени риска возникновения аварийной ситуации на магистральных трубопроводах**

Известно, что пространственно локализованные геодинамические зоны, а также коррозионно-агрессивные среды относятся к числу основных внешних индикаторов, объективно влияющих на безопасность функционирования МТ. Для верификации полученных данных, а также для определения степени их влияния на техническое состояние МТ необходимо провести сопоставление данных, полученных дистанционными методами с существующими статистическими

данными традиционной технической диагностики. Другими словами, необходимо провести комплексный анализ внешних (природных) и внутренних (технологических) индикаторов, влияющих на безопасность функционирования МТ [2].

Существует большое количество методов диагностики МТ, фиксирующих развитие процессов деформации и коррозии. В качестве примера рассмотрим следующие, на наш взгляд наиболее доступные для использования, индикаторы развития деформационных и коррозионных процессов на МТ:  $A_1$  – превышение допустимых значений температурного градиента на входе и выходе участка трубопровода,  $A_2$  – превышение допустимых значений градиента давления на входе и выходе участка трубопровода,  $A_3$  – среднегодовое число ремонтных работ по исследуемому локальному участку МТ,  $A_4$  – число пониженных значений величин потенциалов «труба-грунт»,  $A_5$  – среднегодовое число нарушений изоляции по пилотному участку. Первые три индикатора ( $A_1, A_2, A_3$ ) связаны с развитием процессов пластической деформации, индикаторы ( $A_4, A_5$ ) – отображают развитие коррозионных процессов. При пониженном значении потенциала «труба-грунт» возможно нарушение изоляции трубопровода. При пространственном совмещении локализованных рисков зон, связанных с активной геодинамикой и повышенными значениями градиента температуры или давления, можно прогнозировать аварийное развитие процессов деформации на том или ином участке МТ.



Рисунок 1 - Космический снимок Landsat

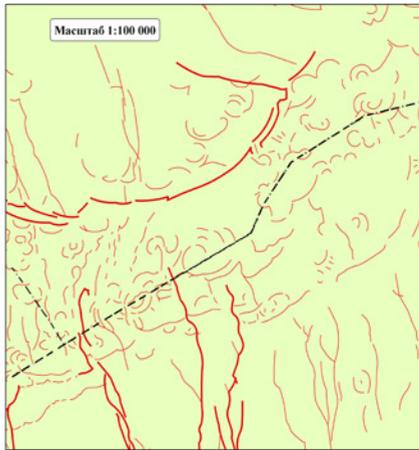


Рисунок 2 - Результат дешифрирования

Рассмотрим комплексный анализ технологических и природных признаков для локализации рисков зон с ускоренным развитием деформационных процессов на примере 100-километровой дистанции МТ. На рисунках 1 и 2 приведен процесс дешифрирования геодинамических разломов различной мощности по данным космической съемки. На рисунке 1 показано, что два крупных геодинамических

разлома пересекают трассу газопровода на 332-ом и 337-ом километрах, образуя при этом рисковую зону с ускоренным развитием деформационных процессов. Пусть также в результате диагностических работ в геодинамическую зону, отмеченную красным цветом, попали повышенные значения градиента давления (синие столбики (рисунок 3)). В этом случае участок магистрального трубопровода, находящийся между 332-ым и 337-ым километрами, можно отнести к рисковому зоне с ускоренным развитием процессов пластической деформации.

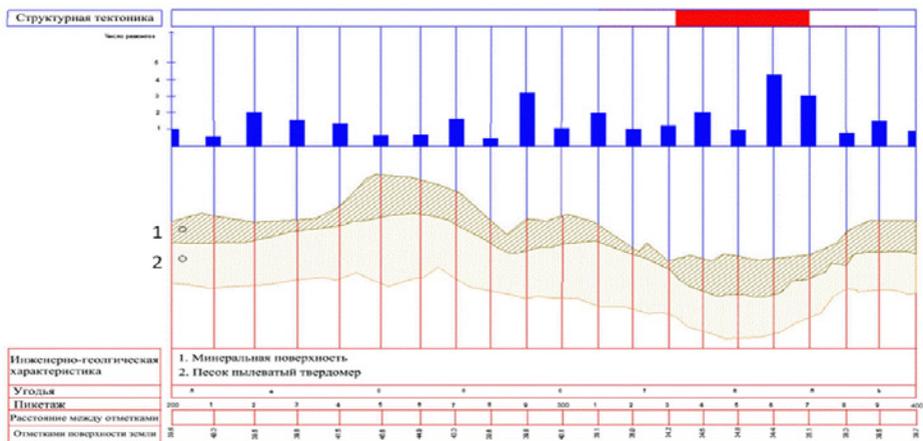


Рисунок 3 – Пример рисковых зон с ускоренным развитием деформационных процессов

Для получения количественных оценок рисковых ситуаций на локальных участках МТ представим результаты комплексирования внешних и технологических индикаторов состояния МТ в виде таблицы Т:

$$T = \left\| T_{ij} \right\|_{m \times n}$$

строками которой

$$t_i = a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ip}, a_{ip+1}, \dots, a_{in}, I = 1, \dots, m$$

являются качественные и количественные характеристики признаков  $a_{ij}$ , описывающих техническое состояние определенного участка  $m_i$  магистрального трубопровода.

При этом качественные признаки:

$$a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ip}, a_{i1} = 0.1$$

определяют наличие или отсутствие геолого-геофизического или геоморфологического признака (геодинамические зоны, зоны солончаков,

грунтовые воды, др.), количественные признаки:  $a_{ip+1}, \dots, a_{in}$  показывают

нормализованные  $0 \leq a_{ij} \leq 1$  числовые значения измеренных диагностических данных в пределах того или иного участка  $m_p$  магистрального трубопровода.

Величина:

$$\phi_p = \sum_{i=1}^n \gamma_{p,i} a_{p,i}, \quad p = 1, \dots, m \quad (1)$$

является интегральной оценкой технического состояния локального участка и, по сути, определяет степень риска возникновения аварийной ситуации на определенном локальном участке магистрального трубопровода.

Коэффициент  $\gamma_{ij}$  определяет степень важности признака  $a_{ij}$ . Например, при пространственном совмещении геодинамической зоны и повышенных значений градиента температуры на входе и выходе трубопроводного участка значение

коэффициента  $\gamma_{pj}$  для  $p$ -го участка будет принимать более высокое значение, что отразится на общей оценке

$$\varphi_p = \sum_{i=1}^n \gamma_{p,i} a_{p,i}, \quad p = 1, \dots, m, \quad (2)$$

Нетрудно видеть, что чем больше значение показателя  $\varphi_p$ , тем выше опасность возникновения чрезвычайных ситуаций на  $p$ -ом участке магистрального трубопровода.

### 1.1.2 Геоинформационная карта рисков

Наиболее информативной формой отображения результатов проведенного «риск-анализа» возникновения аварийной ситуации на локальных участках магистрального трубопровода является геоинформационная карта рисков.

Для построения карты рисков буферная зона трассы МГ разбивалась на локальные участки длиной 1 – 10 км с выделением в ее пределах групп и подгрупп факторов риска. В качестве природных групп факторов риска использовались:

- агрессивные типы почв и грунтов;
- активные геодинамические зоны;
- сейсмоопасные территории;
- сложные условия рельефа;
- водные и транспортные преграды;
- урбанизированные и сельскохозяйственные территории, другие локальные агрессивные природные и техногенные среды.

На основании приведенной выше технологии для каждого локального участка  $m_p$  трассы магистрального газопровода (МГ) по формуле 2 вычислялось значение

степени риска  $\varphi_p$ . Дальнейшая задача риск-анализа состояла в ранжировании локальных участков по величине оценки степени риска в порядке его уменьшения

с использованием алгоритмов автоматической классификации. В результате проведенного ранжирования локальные участки трассы МГ были объединены в следующие классы степени риска: низкой, средней, умеренной, высокой.

На рисунке 4 представлен фрагмент карты рисков для трассы МГ «Газли-Шымкент».



Суммарная степень риска аварийности МГ:



Рисунок 4 - Фрагмент карты распределения степени риска аварийности по локальным участкам магистрального газопровода «Газли-Шымкент»

Созданная карта рисков может быть эффективно использована при планировании первоочередных диагностических и ремонтных работ на магистральном газопроводе.

### Список литературы

- [1] *Хренов Н.Н.*, Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Аэрокосмические методы и обработка материалов съемок. Москва: «Газоилпресс», 2003.
- [2] *Китшақбаев А.И., Закарин Э.А., Мухамедғалиев А.Ф.*, Мониторинг и моделирование территориальных процессов Северного Прикаспия. Алматы: Гылым, 2003г.

## **Раздел 4. Развитие космических технологий**

### **4.1 РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

*Исмаилов М.Б., Алтысбай И.М., Жумаханова В.Р., Нигметчанова Г.Б.,  
Пономарева С.В., Колесников А.Б.*

ДТОО «Институт космических исследований имени академика  
У.М. Султангазина» АО «НЦКИТ»

Основными конструкционными материалами для производства ракетно-космической техники, в том числе космических аппаратов являются сплавы: алюминивно-магниевые типа АМг6; высокопрочные дюралюминиевые Д16, Д16АТ, В95, В96 и легированные литием, скандием 1420, 1460 [1]. Все перечисленные российские сплавы имеют европейские и американские аналоги.

Согласно Вассенаарским договоренностям по нераспространению технологий двойного назначения [2, 3] и Режиму контроля за ракетной технологией [4-5] к свободной продаже на международном рынке допущены алюминиевые сплавы с прочностью до 415 МПа. Основной перечень конструкционных алюминидов (прежде всего- высокопрочных дюралюминидов и новых сплавов), используемых для производства космических аппаратов, подпадают под экспортный контроль. Технологии их производства являются конфиденциальными. Сказанное ставит вопрос относительно разработки отечественных технологий производства материалов, занесенных в международные и национальные списки экспортного контроля [2-6] и считающихся материалами двойного назначения. Технология производства этих материалов достаточно сложна, прежде чем приступить к их разработке необходимо освоить технологии простых конструкционных материалов, таковыми являются широко используемые в машиностроении сплавы АМг6 и Д16.

Целью настоящей работы является получение образцов сплавов АМг6 и Д16, соответствующих действующим стандартам, отработка технологии их получения.

#### **4.1.1 Алюминивно-магниевые сплавы АМг6 (европейский аналог-сплав 1560) , АМг4 (1540), АМг2(1520).**

АМг6 имеет высокие пластические характеристики, как при комнатной, так и при повышенных температурах; обладает высокой коррозионной стойкостью в различных средах, в том числе и в морской воде. Несмотря на довольно значительное увеличение растворимости магния в алюминии при повышенной температуре, упрочнение при закалке сплава АМг6 весьма незначительно, поэтому сплав АМг6, АМг2, АМг4 относятся к термически неупрочняемым. Полуфабрикаты из сплава АМг6 поставляются обычно в отожженном состоянии.

Сплавы АМг относятся к системе Al-Mg-Mn, их химический состав приведен в таблице 1.

марка	Массовая доля элементов, %									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Прочие элементы		Al
								каждый	сумма	
АМг6	0,4	0,4	0,1	0,5-0,8	5,8-6,8	0,2	0,02-0,1	0,05	0,1	ост.
АМг4	0,4	0,5-	0,1	0,2-0,7	3,5-4,5	0,25	0,15	0,05	0,15	ост.
АМг2	0,4	0,5-	0,15	0,1-0,3	1,7-2,4	0,15	0,15	0,05	0,15	ост.

Таблица 1-Химический состав сплавов по ГОСТу 4784-97

Марганец, несмотря на довольно узкий диапазон содержания в сплаве, существенно влияет на его механические свойства. Так, при концентрации Mn на верхнем пределе 0,8%, сплав имеет прочностные свойства на 2-3 МПа выше, чем на нижнем пределе 0,5%. Значительное упрочнение профилей из сплава АМг6 может быть достигнуто холодной деформацией. Деформация алюминиевого сплава растяжением (2-3%) не оказывает заметного влияния на предел прочности профилей из сплава АМг6 и значительно повышает предел их текучести. Относительное удлинение при этом понижается менее интенсивно, чем у других сплавов. Такой характер изменения механических свойств профилей из сплава АМг6 при растяжении наблюдается независимо от режимов термической обработки. Это сужает область применения нагартовочных полуфабрикатов, которые используются для изготовления элементов, скрепляемых заклепочными или болтовыми соединениями.

Исследованы микроструктуры и механические свойства промышленного алюминиевого сплава АМг6 после рекристаллизации [7] с различной степенью деформации ( $\epsilon=0,3-1,6$ ). Показано, что электроимпульсная обработка позволяет получить в сплаве АМг6 мелкозернистую структуру с меньшим размером зерна (2-3 мкм), чем при отжиге (9 мкм) независимо от степени предварительной деформации. Механические испытания на растяжение показали, что измельчение структуры на 60% под влиянием электроимпульсной обработки способствует увеличению относительного удлинения при скорости деформации 8Ч10-4с-1, снижению напряжения течения  $s_{20}$  на 45%, увеличению коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения с 0,3 до 0,5.

### Экспериментальная часть

В наших экспериментах плавка образцов сплава АМг6 осуществлялась в графитовом тигле, с погружением в расплавленный алюминий-марганцевой лигатуры и магния при температуре 750°C. Разливка осуществлялась в графитовую литейницу. В результате исследований механических свойств и микроструктуры литых сплавов установлено, что временное сопротивление образцов составляет  $\approx 130$  МПа, предел текучести – 100 МПа, относительное удлинение - 15%. Выявлена дендритная микроструктура образцов сплавов.

Следующая технологическая операция – гомогенизационный отжиг. Слиток с неоднородной, термодинамически неустойчивой структурой подвергают отжигу, в результате которого структура сплава становится гомогенной; повышается пластичность, что позволяет значительно интенсифицировать последующую обработку давлением (прессование, прокатка) и уменьшить технологические отходы. Опытным путем подобран режим гомогенизационного отжига при температуре 515°C с выдержкой 1 час. Следует учесть, что длительная гомогенизация может привести к отрицательным эффектам, например, к образованию вторичной водородной пористости в слитке.

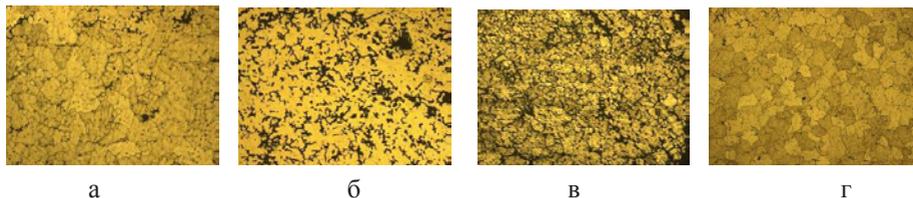
Нагрев и выдержка при гомогенизации обеспечивают полное растворение неравновесных эвтектических включений. Выдержка должна быть тем больше, чем грубее эти включения, величина которых зависит от скорости кристаллизации при литье.

Следующая операция – пластическая деформация. Сплав АМг6 хорошо катается как при горячей, так и при холодной прокатке. Выбор типа прокатки зависит от назначения готовой продукции, а также от размеров слитка и готового изделия. Обычно на крупных промышленных предприятиях с годовым объемом в несколько тысяч тонн, применяется и горячая (заготовка >12 мм) и холодная прокатка (заготовка <12 мм).

Для возвращения пластичности и возможности дальнейшей деформации проводился рекристаллизационный отжиг при температуре  $T=290-310^{\circ}\text{C}$ .

В наших лабораторных условиях выполнены исследования по влиянию горячей и холодной деформации с 10% обжатием на прочностные характеристики образцов. Выявлено, что при холодной прокатке, по сравнению с горячей, 10%-ое обжатие достигается большим количеством проходов.

Результаты механических испытаний показали, что после рекристаллизации временное сопротивление образцов достигло 374 МПа, предел текучести 290 МПа, а относительное удлинение возросло до 17%. На рисунке 1 показана последовательность изменения микроструктуры сплава в технологическом процессе.



а - литое состояние; б - гомогенизированное состояние; в - прокатанное состояние; г - рекристаллизованное состояние

Рисунок 1 – Микроструктура сплава АМг6

Видно, что структура рекристаллизованного состояния, по сравнению с литым, отличается равномерной мелкозернистостью. Общая схема изменения прочностных характеристик и сравнительные данные международных стандартов

представлены в таблице 2.

Прочностные характеристики	Состояние сплава				Стандарт	
	Литое	Гомогени- зированное	Прокатанное	Рекристалли- зованное	ГОСТ 21631-76	ISO 6362-2
$\sigma_B$ , МПа	130	270	300	374	315	275-315
$\sigma_{0,2}$ , МПа	100	200	260	290	155	115-140
$\delta$ , %	15	15	6	17	15	25-35

Таблица 2 – Механические свойства сплава АМг6 (1560)

В результате проведенных работ получены образцы сплава АМг6 с механическими свойствами, значительно превышающими требования ГОСТ 21631-76 и ГОСТ 17232 и европейского стандарта по прочностным показателям [8].

#### 4.1.2 Дюралюминий Д16 (европейский аналог –сплав 2024)

Для обеспечения сбалансированности химического состава сплава Д16 авторами работы [9] предложено за нижние пределы легирования принимать процентное содержание меди и магния, соответствующее их совместной предельной растворимости при 495°С. Верхний предел соответственно на 0,1-0,2 масс.% выше значений предельной растворимости. Авторами патента показано, что основные этапы термообработки должны выдерживаться в очень узких пределах температур с высокой точностью стабилизации нагрева. В патенте описан технологический процесс литья заготовок из сплава 2024 с последующей термообработкой полученных заготовок на всех этапах производства.

Химический состав сплава Д16 приведен в таблице 3.

Марка	Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Прочие элементы	Плотность кг\см <sup>3</sup>
Д16 1160	0.5	0.5	0.3- 0.9	0.15	Осталь- ное	3.8- 4.9	1.2- 1.8	0.25	прочие, каждая 0.05; всего 0.1	2,77

Таблица 3-Химический состав сплава Д16 по ГОСТ 4784-97 (%)

Немаловажным фактором является улучшение структуры сплава Д16 в процессе литья слитков и кристаллизации расплава.

#### Экспериментальная часть

В наших экспериментах проведена плавка образцов алюминий-магниевого сплава с основными легирующими компонентами – медью и марганцем, соответствующих промышленному высокопрочному деформируемому алюминиевому сплаву Д16 (2024). Для получения необходимого содержания компонентов в сплаве определен оптимальный температурно-временной режим плавки и выявлены условия превышения легирующих элементов в шихте в

пределах 5-25%.

Плавка осуществлялась в интервале температур от 700 до 800°C с последовательным погружением в тигель алюминий марганцевой лигатуры, магния и меди.

Установлено, что после плавки при 750°C временное сопротивление сплава составляет  $\approx 150$  МПа, предел текучести – около 100 МПа, относительное удлинение - 12%. Микроструктура литых образцов сплава Д16 приведена на рисунке 2.

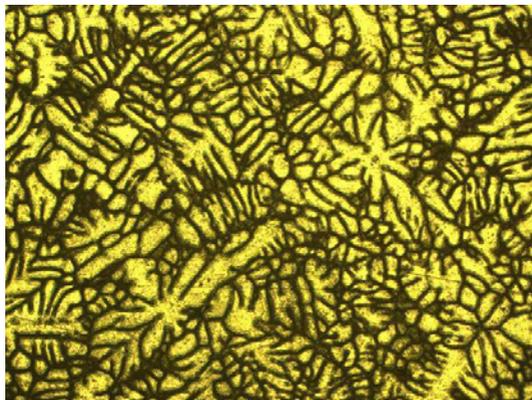
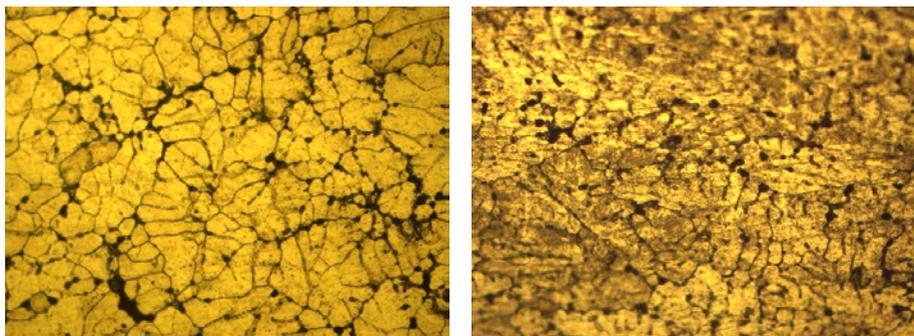


Рисунок 2 – Микроструктура литого состояния сплава Д16; x100

Металлографическими исследованиями выявлены размытая дендритная микроструктура с узкими негомогенными остаточными зонами междендритных пространств и различного рода точечные выделения по всему объёму сплава. Полученные данные свидетельствуют о том, что сплав Д16, является термически упрочняемым и реагирует на скорость охлаждения даже по сечению.

После гомогенизационного отжига образцы были подвергнуты пластической деформации. Проведены исследования влияния холодной деформации на прочностные характеристики образцов, степени обжатия на пространственную ориентацию зеренной структуры.

Первая прокатка образцов после гомогенизационного отжига ( $T=480^{\circ}\text{C}$  в течении 4 часов) была выполнена при степени деформации 11%. Скорость вращения валков составляла 3 об/мин, диаметр валков – 58 мм. Металлографический анализ показал, что в процессе гомогенизации сплава наряду с растворением эвтектических включений  $\beta$ -фазы ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) и S-фазы ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) из твердого раствора выделяется марганцевый интерметаллид в дисперсном виде. На рисунке 3 показаны микроструктуры участков образцов после прокатки, в том числе в центральной области и в области приложения нагрузки. Структура представляет собой мелкозернистые вытянутые зёрна. Средний размер зерна составляет около 7-8 баллов.



а

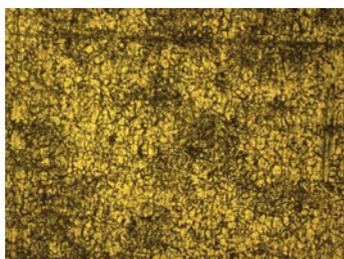
б

а - центральная часть; б - деформированная поверхность; x200

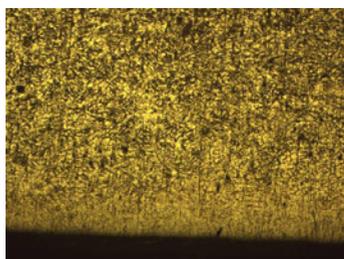
Рисунок 3 – Микроструктура образца после процесса прокатки при степени деформации 11%

Для снятия внутренних напряжений между проходами при холодной прокатке необходим промежуточный отжиг. Проведен рекристаллизационный отжиг при температуре 420<sup>0</sup>С в течении 2 час и дополнительная прокатка при степени деформации 2%. Суммарная степень обжатия составила 13%.

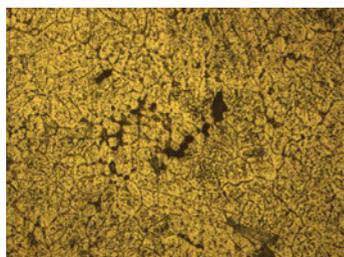
Следующий промежуточный отжиг перед прокаткой осуществляли при температуре 450<sup>0</sup>С в течении 2 часов. Проведена прокатка при степени деформации 3%. Суммарная степень обжатия составила 16%, в соответствии с рисунком 4.



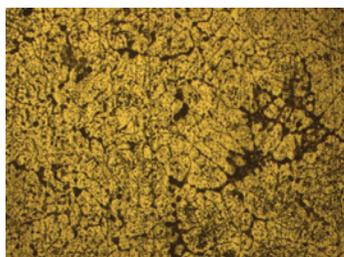
а



б



в



г

а, в - центральная часть; б, г - область приложения давления; а, б - x100; в, г - x200

Рисунок 4 – Микроструктура образца после процесса прокатки при степени деформации 16%

Результаты испытаний показали улучшение прочностных характеристик сплава. Предел прочности составил 308 МПа, предел текучести - 245 МПа, относительное удлинение - 13%. Промежуточные отжиги способствовали упрочнению сплава, в то же время структура образцов с каждым отжигом становилась всё более однородной и мелкозернистой.

Динамика роста характеристик образцов сплава Д16 в зависимости от последовательности обработки представлена в таблице 4.

Сплав	Свойства	Литье	Гомоген-ный отжиг	Деформация (прокатка)	Закалка	Старе-ние	ГОСТ 21488-97
Д16 (2024)	$\sigma_B$ , МПа	150	280	308	355	409	390 - 410
	$\sigma_{0,2}$ , МПа	100	160	245	260	294	275 - 295
	$\delta$ , %	12	18	14	13	10	8 - 10

Таблица 4 - Механические свойства сплавов типа Д16

Как показано в работе [10] закалка алюминиевых сплавов основана на фиксации структуры путем быстрого охлаждения твердого раствора, стабильного при более высокой температуре. При нагреве сплавов Д16 выше линии ограниченной растворимости, содержащего 4% Cu, до температуры  $t_1$ , включения  $CuAl_2$  растворяются, и образуется однофазный твердый  $\alpha$ -раствор. Быстрым охлаждением фиксируется твердый  $\alpha$ -раствор меди в алюминии. В условиях нашего эксперимента из образцов сплава Д16 ( $t_1=500^\circ C$ , быстрое погружение в воду при  $T \approx 40^\circ C$  и временем выдержки 90 мин) образуется фиксированный твердый  $\alpha$ -раствор меди в алюминии. Микроструктура данного образца изображена на рисунке 5.

После закалки алюминиевые сплавы подвергают искусственному старению, при котором происходит распад пересыщенного твердого раствора.

В наших экспериментах опытным путем подобран режим искусственного старения образцов сплава Д16: нагрев при  $190^\circ C$  в течение 3 час [11]. Результаты металлографических исследований искусственно состаренных образцов, представлены на рисунке 6.



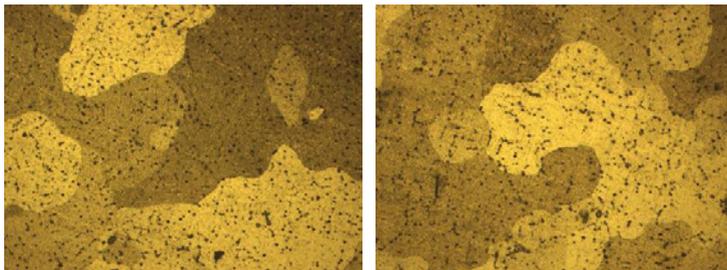


Рисунок 5 - Микроструктура сплава Д16, закалённого в воде при 5000С в течение 90 минут, x200

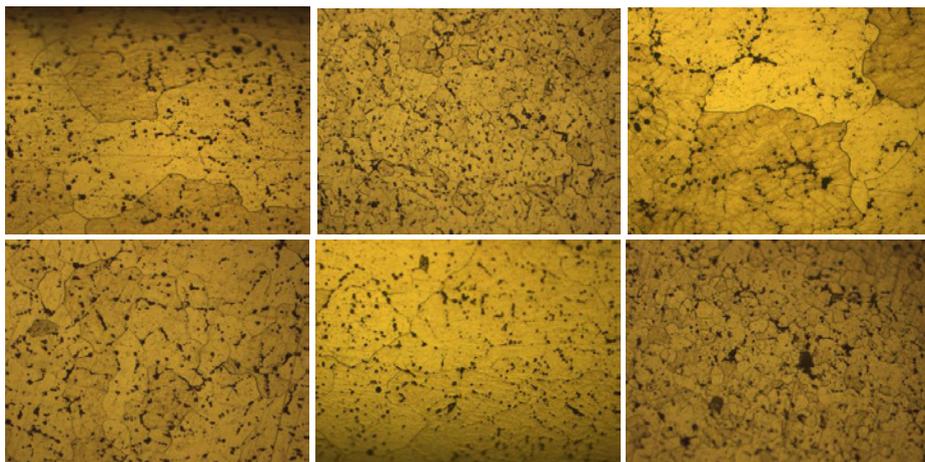


Рисунок 6 - Микроструктура сплава Д16 при 1900С, в течение 3часов, x200

Нагрев до температур выше рекомендованной приводит к значительному снижению прочности и пластичности, поэтому необходимо строго соблюдать при заключительной обработке сплава Д16 указанную температуру нагрева при искусственном старении.

Таким образом, были отработаны технологические процессы получения сплавов АМг6 и Д16, обеспечивающие требования ГОСТам на механические свойства продукции.

Разработаны Технологические регламенты (технологические инструкции) на производство алюминиев-магниевого сплава АМг6, АМг4, АМг2 и дюралюминия Д16, в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 3.1105-84. Описаны оптимальные режимы каждой операции получения сплавов и технологическое оборудование для производства.

## Список литературы

- [1] *Исмаилов М.Б.* Анализ применения конструкционных материалов для космических аппаратов.- в кн.: Прикладные космические исследования в Казахстане, Алматы, Национальное космическое агентство РК, АО «НЦКИТ», 2010, С. 237-245.
- [2] Wassenaar Arrangement on Export Controls for Conventional arms and Dual-use Controls and Technologies – <http://www.wassenaar.org>.
- [3] Список товаров и технологий двойного назначения, которые могут быть использованы при создании вооружений и военной техники и в отношении которых осуществляется экспортный контроль.- <http://www.infotest.ru/lows/detail.php?ID=1637>.
- [4] Missile Technology Control Regime (M.T.C.R.) // <http://www.armcontrol.org/documents/mtrc>.
- [5] Руководство к приложению по режиму контроля за ракетными технологиями (ПКРТ) -2010. – [http://www.mtrc.info/english/MTCR\\_Annex\\_Handbook\\_RUS.pdf](http://www.mtrc.info/english/MTCR_Annex_Handbook_RUS.pdf).
- [6] Список оборудования, материалов и технологий, которые могут быть использованы при создании ракетного оружия и в отношении которых установлен экспортный контроль.- <http://www.information.ru/rus/inter/uk/1005-uk.txt/>
- [7] *Барыкин, Н.П.* Структура и механические свойства алюминиевого сплава АМг6, подвергнутого пластической деформации и электроимпульсной обработке. / Барыкин Н.П., Валеев И.Ш., Трифонов В.Г., Валеева А.Х. // Вопросы материаловедения 2004. – Т 1, № 1 - С. 23-30.
- [8] Технологически регламент (технологическая инструкция) «Производство и прокатка алюминивно-магниеваых сплавов».- Алматы, АО «Национальный центр космических исследований и технологий», 2011.
- [9] *Ribes Herve ; Raynaud Guy-Michel; Dif Ronan ; Schmidt Martin Peter .* Method of manufacturing formed pieces of type 2024 aluminum alloy//C22F001/04,10/382, 519; US 2003/0140990 A1.- 7.03, 2003/[www.google.com/patents/](http://www.google.com/patents/) P.11.
- [10] *Чаусов Н.Г., Волянская Е.М.* Закономерности деформирования листовых алюминиевых сплавов при динамических неравновесных процессах // V Российская научно-техническая конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» -Киев, Украина. - 2011. – С.58-61.
- [11] Технологическая инструкция «Производство и прокатка дюралюминиевых сплавов». - Алматы, АО «Национальный центр космических исследований и технологий», 2012.

## 4.2 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ПОКРЫТИЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

*Исмаилов М.Б., Алтысбай И.М., Байгонов А.Д.*

ДТОО «Институт космических исследований  
имени академика У.М. Султангазина.» АО «НЦКТИ»

Космический аппарат непрерывно получает тепло от внутренних и внешних источников прямого солнечного излучения, отражённого от планеты излучения, собственного излучения планеты, трения об остатки атмосферы планеты на высоте аппарата. Также аппарат теряет тепло в виде излучения. Многие узлы космических аппаратов, прежде всего электронные, не терпят перегрева или переохлаждения. Для поддержания необходимого уровня температур в космических аппаратах имеется система терморегулирования. Эта система состоит из активной части в виде тепловых труб и нагревателей, и пассивной - в виде светоотражающих и светопоглощающих, так называемых терморегулирующих покрытий (ТРП). ТРП характеризуются коэффициентом поглощения солнечной энергии  $E_s$  и условно делятся на «белые» -  $E_s \leq 0,2 - 0,3$ ; «серые» -  $E_s=0,4 - 0,6$ ; «черные» -  $E_s \geq 0,9$ . «Белые» покрытия наносятся на открытые участки космических аппаратов для предотвращения нагревания Солнцем, «черные» - на радиаторы сброса излишнего тепла. На ТРП возлагаются следующие условия: сохранение своих характеристик при длительном воздействии (до 15 лет) факторов космического пространства (вакуум, перепады температур, ультрафиолетовое и корпускулярное излучение, ионы кислорода); имеют токопроводящие свойства для снятия статического электричества [1, 2].

ТРП могут быть получены путем различных способов напыления металлов, сплавов, оксидов, нитридов [3, 4]. Однако, по совокупности свойств, наибольшее применение нашли лакокрасочные покрытия [5-7]. Недостатком лакокрасочных покрытий является потеря светоотражающих и светопоглощающих свойств под действием факторов космического пространства: «белые» и «черные» покрытия со временем деградируют и превращаются в «серые», имеются проблемы с электропроводностью. Работы над совершенствованием лакокрасочных покрытий продолжаются. Примером этому являются открытые тендера российского Федерального космического агентства на выполнение следующих НИОКР:

-проект «Разработка технологии получения терморегулирующих покрытий взамен существующих покрытий (эмали 40-1-28 и ФП-5246) для космических аппаратов» (2009-2011 гг. на сумму 47,6 млн.рублей). Поставлена задача получения эмалей, стойких к воздействию факторов космического пространства в течение 15 лет [8];

-проект «Разработка новых специальных конструкционных материалов и технологий получения из них полуфабрикатов, деталей, элементов конструкций для перспективных изделий ракетно-космической техники нового поколения с повышенными технико-технологическими характеристиками, в части разработки

черного термостойкого пигмента для терморегулирующих радиационностойких покрытий (ТРП) и ограничительного перечня конструкционных материалов для изделий ракетно-космической техники со сроком активного существования 15 лет и более» (2010-2013 гг. на сумму 49 млн.рублей). Поставлена задача разработки нового черного пигмента, новой эмали на их основе нового покрытия устойчивого к ФКП [9].

Основным недостатком лакокрасочных покрытий является наличие органических связующих, которые деградируют (вопрос лишь в скорости) под действием ФКП. Анализ работ по ТРП показывает, что ведутся интенсивные исследования по поиску новых, альтернативных видов высокоэффективных покрытий. Среди направлений поиска мы не встретили ТРП из интерметаллидов. Ввиду этого, нами экспериментально исследовались возможные пути получения интерметаллидных покрытий и изучены их характеристики на предмет прочности, электропроводности и возможности регулирования светоотражающих свойств.

Интерес к интерметаллидам обусловлен тем, что для них характерна физическая и химическая прочность, устойчивость к окислению при обычной и повышенной температурах, отсутствие органических связующих, электропроводность.

В качестве метода нанесения покрытий нами выбран метод послойного магнетронного напыления на подложку пары металлов, из которых предполагалось получить интерметаллид [10]. Поставлена задача получения покрытий интерметаллидов Al-Cu и Al-Zn на медной подложке.

Напыление осуществлялось магнетроном в вакуумной установке ВУП-4. Отработаны оптимальные режимы получения качественных покрытий: сила тока в пределах 10-20 мА, вакуум с остаточным давлением  $10^{-2}$  Па, время напыления 5-40 минут.

Для определения толщины слоев, напыленных на медную подложку, покрытие параллельно наносилось на стекло. Измерение толщины наносимого слоя (96-694 нм) проводилось на атомно-силовом микроскопе JSPM-5200, в зависимости от режима напыления. Данные зависимости толщины покрытия от времени напыления представлены в таблице 1.

Металл	Zn			Al			Cu			
	5	10	20	10	20	40	5	10	20	40
Время напыления, мин	320	507	694	276	368	623	96	185	217	475
Толщина пленки, нм										

Таблица 1 – Толщина напыленных слоев

#### 4.2.1 Результаты экспериментов по напылению чередующихся слоев Al и Cu

На поверхность медной подложки наносились чередующиеся слои алюминия и меди, состоящие из 3-7 слоев с общей толщиной 3 мкм. Для определения твердости слоёв были измерены микротвердость и глубина проникновения индентора микротвердомера. Микротвердость нанесенных слоев представлена в

таблице 2, а микрофотография образца с отпечатками индентора на рисунке 1.

№ эксперимента	Подложка Cu с напыленными слоями (индекс указывает время напыления, мин)	Микротвердость, МПа	Глубина проникновения индентора, мкм
1	металлический Al	263	
2	металлический Cu	818	
3	Cu+Al <sub>10</sub> +Cu <sub>5</sub> +Al <sub>10</sub>	204	2,763999
4	Cu+Al <sub>20</sub> +Cu <sub>10</sub> +Al <sub>20</sub>	220	2,539165
5	Cu+Al <sub>40</sub> +Cu <sub>20</sub> +Al <sub>40</sub>	264	2,462569
6	Cu+Al <sub>40</sub> +Cu <sub>20</sub> +Al <sub>40</sub> +Cu <sub>20</sub> +Al <sub>40</sub> +Cu <sub>20</sub> +Al <sub>40</sub>	~6000	3,064079

Таблица 2 – Микротвердость тонкопленочных покрытий

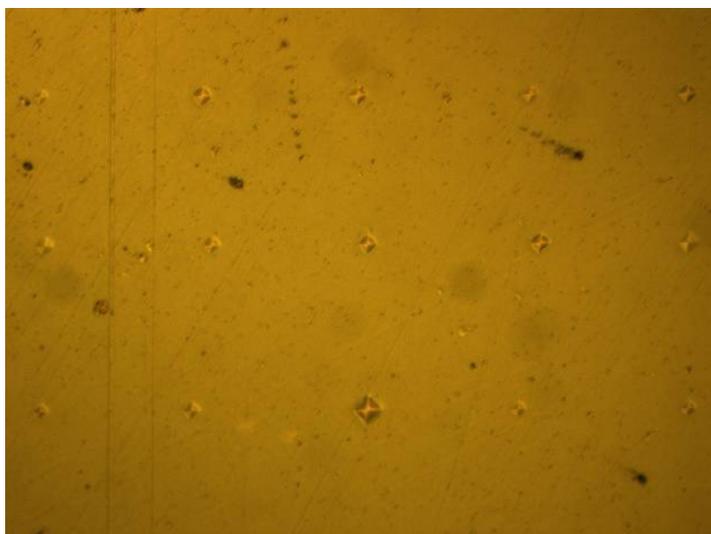


Рисунок 1 – Микрофотография поверхности напыленных слоев с отпечатками индентора системы медь-алюминий

Из данных таблицы 2 и рисунка 1 видно, что с увеличением времени напыления, а значит и толщины, микротвердость трехслойных покрытий растет. Об этом свидетельствуют и данные по глубине проникновения индентора.

Наибольшая прочность была получена в эксперименте № 6, как показано в таблице 2, с 7-ю нанесенными слоями. Микротвердость покрытия составила около 6000 МПа с разбросом в 100 МПа.

Для определения надежности сцепления (адгезии) напыленных слоев применялся метод царапин, который применяют для покрытий толщиной не более 20 мкм [11]. Суть метода заключается в нанесении рисок на поверхность

контролируемого покрытия острием алмазной пирамидки. Твердость материала острия должна быть выше твердости покрытия. Наносилось не менее трех параллельных рисок с расстоянием между ними от 2 до 3 мм и перпендикулярно к ним. Осмотр образцов невооруженным глазом и под микроскопом показал, что отслоения покрытия не произошло.

Для получения интерметаллидных фаз «сырое» покрытие подверглось термообработке при температуре 150<sup>0</sup>С с выдержкой 1 час на воздухе. После термообработки были повторно измерены твердости покрытий, результаты которых приведены в таблице 3.

№ эксперимента	Подложка Cu с напыленными слоями (индекс указывает время напыления, мин)	Микротвердость «сырых» покрытий, МПа	Микротвердость покрытий после термообработки, МПа
1	Cu+Al <sub>10</sub> +Cu <sub>5</sub> +Al <sub>10</sub>	204	2430
2	Cu+Al <sub>20</sub> +Cu <sub>10</sub> +Al <sub>20</sub>	220	2570
3	Cu+Al <sub>40</sub> +Cu <sub>20</sub> +Al <sub>40</sub>	264	2600
4	Cu+Al <sub>40</sub> +Cu <sub>20</sub> +Al <sub>40</sub> +Cu <sub>20</sub> +Al <sub>40</sub> +Cu <sub>20</sub> +Al <sub>40</sub>	~6000	~6000

Таблица 3- Микротвердость покрытий «сырых» и после термообработки

Данные таблицы 3 показывают, что микротвердость трехслойных покрытий после термообработки на порядок возросла, а у семислойных -осталась практически без изменений.

Ранее [10, 12] нами исследовалась термодиффузия пары Cu-Al при 550-700<sup>0</sup>С. В ходе нагрева образцов двух металлов, плотно притертых друг к другу, медная часть не претерпевала изменений, а со стороны алюминия получился сплав, представляющий собой эвтектику, состоящую из смеси твердого раствора Cu-Al и интерметаллидов AlCu<sub>2</sub>, AlCu, Al<sub>2</sub>Cu. На границе контакта образуется диффузионная зона, состоящая из нескольких разделенных слоев. Ширина этих слоев составляет около 5 мкм (ближайшая к меди), 50-100 мкм (ближайшая к алюминию) и 30-50 мкм (средний слой). Величина микротвердости слоя из интерметаллида AlCu<sub>2</sub> оказалась наибольшей – 5600 МПа. Значения твердости остальных промежуточных слоев, соответственно, 4500-4800 МПа и 3940-4200 МПа.

На основании этих данных нам представляется возможным интерпретировать фазовый состав покрытия в эксперименте №4 близким к интерметаллиду AlCu<sub>2</sub>, для экспериментов 1-3 –как смесь твердого раствора Al-Cu с интерметаллидами Al-Cu, в соответствии с таблицей 3.

Данные таблицы 3 показывают, что «сырые» трехслойные покрытия переходят в почти интерметаллидные только после термообработки, а семислойные «сырые» покрытия уже представляют собой интерметаллид без термической обработки.

Природа этого явления пока не совсем ясна.

#### 4.2.2 Результаты экспериментов по напылению чередующихся слоев Al и Zn

При нанесении цинка на медную подложку использовалась предыдущая методика. На медную подложку поочередно напыляли цинк и медь. Режим напыления, в частности время напыления, выбиралось таким образом, чтобы толщина слоев получалась одинаковой. Экспериментально установлено, что для получения одинаковой толщины напыления цинка требуется в ~2 раза меньше времени, чем для меди. Получены структуры с тремя и более слоями. Далее проводилось измерение микротвердости, данные которых представлены в таблице 4.

№ эксперимента	Подложка Cu с напыленными слоями (индекс указывает время напыления, мин)	Микротвердость «сырых» покрытий, МПа	Микротвердость покрытий после термообработки, МПа
1	Cu+Zn <sub>5</sub> +Cu <sub>10</sub> +Zn <sub>5</sub>	85	970
2	Cu+Zn <sub>10</sub> +Cu <sub>20</sub> +Zn <sub>10</sub>	170	1210
3	Cu+Zn <sub>20</sub> +Cu <sub>40</sub> +Zn <sub>20</sub>	185	1340
4	Cu+ Zn <sub>10</sub> +Cu <sub>20</sub> +Zn <sub>10</sub> +Cu <sub>20</sub> +Zn <sub>10</sub> +Cu <sub>20</sub> +Zn <sub>10</sub>	2600	2400

Таблица 4-Микротвердость покрытий «сырых» и после термообработки

Из таблицы 4 видно, что микротвердость с увеличением времени напыления для трехслойных структур растет и достигает значения 2600 МПа. При такой величине индентор фиксирует твердость непосредственно напыленных слоев. В этом случае твердость подложки (меди), величина которой равняется 818 МПа, не оказывает влияние на значение микротвердости покрытия [10].

Данные таблицы 4 показывают те же закономерности, характерные для покрытия в системе Al-Cu: в трехслойных покрытиях для синтеза интерметаллидов нужна термообработка, для семислойных – интерметаллиды синтезируются в ходе их нанесения.

#### 4.2.3 Оптические и электрические свойства покрытий

Измерение коэффициента светопоглощения  $E_s$  семислойных покрытий проводилось на установке Lambda 35. Величина  $E_s$  в диапазон длин волн 250-1100 нм составила для:

-медно-алюминиевого интерметаллидного покрытия -0,30, что позволяет отнести его к классу светоотражающих покрытий;

-медно-цинкового интерметаллидного покрытия – 0,75, его можно отнести к классу светопоглощающих покрытий.

Оба покрытия обладают хорошими электропроводящими свойствами, что очень важно для снятия статического электричества на элементах космических

аппаратов.

### **Выводы**

1 Получены многослойные покрытия путем послойного магнетронного напыления на медную подложку металлов, в одном случае Cu и Al, в другом - Cu и Zn. Установлено, что они обладают хорошей адгезией к подложке.

2 Рекомендуемая толщина одного напыляемого слоя 100-700 нм, итоговая толщина покрытия 3-10 мкм.

3 Показано, что в «сырых» трехслойных покрытиях интерметаллиды синтезируются после 1 часовой термообработки при 150<sup>0</sup>С, а в семислойных – при изготовлении «сырых». Природа этого эффекта не совсем ясна.

4 Микротвердость 7 слойных покрытий составляет 6000 МПа для системы Cu-Al, 2400-2600 МПа для системы Cu-Zn, превышающая микротвердость металлов, из которых они состоят.

5 Показано, что покрытие на основе Al и Cu обладает светоотражательными свойствами, а на основе Cu и Zn – светопоглощающими. Оба покрытия имеют хорошие электропроводящие свойства.

6 Полученные результаты говорят о перспективности исследования интерметаллидных покрытий в качестве ТРП.

### **Список литературы**

[1] *Салахутдинов Г.М.* Тепловая защита в космической технике.- М., Знание, 1982 ; <http://www.epizodsspace.no-ip.org>

[2] *Акишин А.И., Новиков Л.С.* Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. // М., Знание, 1983; <http://www.epizodsspace.airbase.ru/>

[3] Газотермическое нанесение специальных покрытий.- // ГКНПЦ им.М.В. Хруничева, <http://www.khrunichev.ru>

[4] *Халиманович В.И., Харламов В.А., Ермолаев Р.А.* и др. Испытания лабораторных образцов терморегулирующих покрытий углепластиковых элементов космических аппаратов. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева, 2009, № 3, с. 110-113.

[5] Исследование эксплуатационных (термооптических) характеристик терморadiационных покрытий и динамика их изменения в процессе длительного орбитального полета в составе комплекса МКС. // ЦНИИМАШ, <http://knts.tsniimash.ru>

[6] Лакокрасочные терморегулирующие покрытия.-ОАО «Композит», <http://www.kompozit-mv.ru>

[7] *Бахвалов Ю.О., Векишина Т.И., Воробьев А.А.* Композиция для терморегулирующего покрытия класса «солнечные отражатели», // Патент России № 2283332 от 17.02.2005.

[8] Открытый конкурс Федерального космического агентства на проект «Разработка технологии получения терморегулирующих покрытий взамен существующих покрытий (эмали 40-1-28 и ФП-5246) для космических аппаратов» (2009-2011 г.г.) // <http://www.federalspace.ru>

[9] *Кузьмичев А.И.* Магнетронные распылительные системы. // Киев, Аверс, 2008, 246с.

[10] *Аубакирова Р.К., Алтысбай И.М.* Исследование слоистых структур промышленных материалов, полученные методом термодиффузии. // Вестник КазАТК им. М. Тынышпаева.- 5. - 2010.

[11] ГОСТ 9.302-88 «Покрyтия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля»

[12] *Исмаилов М.Б., Алтысбай И.М., Аубакирова Р.К.* и др. Разработка научных основ создания слоистых металлических материалов для космической техники. // Отчет на научно-исследовательской работе, Алматы, АО «Национальный центр космических исследований и технологий», 2011,83 с., № Госрегистрации 0109РК00349, инв. № 0211РК00695.

## 4.3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОПОРТАЛА В СИСТЕМЕ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЧС В КАЗАХСТАНЕ

*Архипкин О.П., Сагатдинова Г.Н.*

ДТОО «Институт космических исследований имени академика  
У.М. Султангазина» АО «НЦКИТ»

### 4.3.1 Краткое описание современного состояния системы космического мониторинга ЧС в Казахстане

Развиваемые в Институте космических исследований (ИКИ) АО «НЦКИТ» уже более 10 лет технологии космического мониторинга ЧС в Казахстане [1-8] базируются на данных дистанционного зондирования (ДДЗ) MODIS с американских спутников EOS Terra и Aqua, принимаемых на станциях приема ИТЦ «СКАНЕКС» в Астане и Алма-Ате.

В настоящее время ИКИ осуществляет космический мониторинг ЧС на территории Казахстана практически круглогодично. С января по май проводится оперативный космический мониторинг схода снежного покрова и прохождения паводковых вод для 7 областей, с середины марта по ноябрь - оперативный космический мониторинг пожаров на всей территории Казахстана, с октября по декабрь - космический мониторинг формирования снежного покрова и зон затопления в среднем течении реки Сырдарья, включая мониторинг динамики водной поверхности Гидрокомплекса Чардаринское водохранилище - Коксарайский противопаводковый контррегулятор. При этом период решения варьируется в зависимости от конкретного региона и погодных условий текущего сезона.

В процессе оперативного космического мониторинга прохождения паводковых вод формируются:

- обзорные карты состояния снежного и ледяного покрова территории области.

- карты состояния водного покрова территории области с выделением зон затопления.

Для отдельных регионов дополнительно формируются:

- карты и диаграммы динамики водной поверхности крупных водохранилищ.

Технологии оперативного космического мониторинга схода снежного покрова и прохождения паводковых вод и наводнений внедрены в Западно-Казахстанской (с 2003 года), Карагандинской (с 2005 года), Восточно-Казахстанской (с 2008 года) областях и при мониторинге территорий в среднем течении реки Сырдарья (с 2003 года). Всего такие технологии были адаптированы для девяти областей Казахстана (таблица 1).

№	Название области	Площадь (км <sup>2</sup> )	Космический мониторинг прохождения паводковых вод и наводнений*	Оперативный космический мониторинг пожаров	Обзорный космический мониторинг крупных пожаров
1	Акмолинская область	121400	+	+	+
2	Актюбинская область	299900	-	+	+
3	Алматинская область	223700	+	+	+
4	Атырауская область	111600	-	+	+
5	Восточно-Казахстанская область	279700	+	+	+
6	Жамбылская область	143500	+	+	+
7	Западно-Казахстанская область	151100	+	+	+
8	Карагандинская область	429100	+	+	+
9	Кзылординская область	225500	+	+	+
10	Костанайская область	195200	-	-	+
11	Мангистауская область**	158800	-	-	+
12	Павлодарская область	124000	+	+	+
13	Северо-Казахстанская область	122600	-	-	+
14	Южно-Казахстанская область	117200	+	+	+
	Итого	2703300	-	2226700 / 82,4%	2703300 / 100%

Таблица 1 - Охват регионов Казахстана задачами космического мониторинга ЧС

\* В задачу также входит космический мониторинг схода снежного и ледового покровов. Процент охвата не вычисляется, так как между площадью области и площадью водного бассейна нет прямой взаимосвязи.

\*\* В области практически нет ни паводков, ни пожаров. Без нее процент охвата оперативным мониторингом пожаров территории Казахстана составляет 88, 2 %

В процессе оперативного космического мониторинга пожаров формируются:

- карты очагов пожаров с привязкой к населенным пунктам на основе ночных снимков (ежедневно);

- карты очагов пожаров с привязкой к населенным пунктам на основе дневных снимков (ежедневно);

- карты-маски выгоревших и пострадавших от пожаров площадей на территории области (ежедекадно).

- таблицы величин выгоревших площадей для районов и по области в целом по нарастающему итогу (ежедекадно).

Технологии оперативного космического мониторинга пожаров внедрены в Западно-Казахстанской (с 2001 года), Актюбинской (с 2003 года), Карагандинской (с 2005 года), Восточно-Казахстанской (с 2008 года) и Алматинской (с 2008 года) областях (таблица 1). Всего такие технологии были адаптированы для одиннадцати областей Казахстана (таблица 1).

Результаты оперативного космического мониторинга в режиме реального времени передаются по электронной почте в Областные управления по мобилизационной подготовке, гражданской обороне, организации предупреждения и ликвидации аварий и стихийных бедствий, а также по другим адресам, указанным ими.

Наряду с оперативным проводится и обзорный космический мониторинг крупных пожаров, при котором формируются обзорные декадные карты очагов крупных пожаров для всей территории Казахстана (таблица 1). Далее на основе декадных в ГИС-среде формируются обзорные месячные карты, а на базе последних - сезонные карты очагов крупных пожаров. Все эти карты передаются в МЧС РК.

С 2010 года начали развивать и другой путь распространения данных космического мониторинга ЧС с использованием геопортала космического мониторинга ЧС.

#### **4.3.2 Принципы организации и структура геопортала космического мониторинга чрезвычайных ситуаций**

В ближайшее время геопортал станет основным источником передачи результатов космического мониторинга ЧС всем заинтересованным организациям. Для достижения этой цели, прежде всего, необходимо, чтобы геопортал физически мог работать с большими количествами пространственных данных и с большим числом пользователей, а также разработать технологию актуализации баз пространственных данных геопортала, обеспечивающую оптимальную и своевременную, в том числе оперативную, загрузку новых данных.

Функционирование геопортала в рабочем режиме требует обеспечения гибкой системы распределения прав доступа к содержащейся на нем информации. Это обусловлено, с одной стороны, задачей обеспечения информационной безопасности геопортала. Доступ к наиболее важным базовым структурам и составным частям геопортала должен быть обеспечен только квалифицированным специалистам, обеспечивающим работу геопортала.

С другой стороны, работа геопортала «Космический мониторинг ЧС» направлена, прежде всего, на обеспечение необходимой информацией органов ЧС различного уровня (от республиканского до районного), а также ряда других государственных структур, чья деятельность также требует своевременного получения информации о различных ЧС. Среди таких организаций, например,

структуры, связанные с лесным и водным хозяйством. Заинтересованы в своевременном получении информации о ЧС и многие частные структуры, работа которых непосредственно зависит от этого.

Специфика работы государственных и частных структур также обуславливает ограничение прав доступа, что связано с использованием ими при работе с геопорталом различной информации, в том числе картографической, имеющей закрытый или ограниченный характер. В связи с этим, можно выделить три основных права доступа к информации: закрытый, открытый и публичный. Закрытый позволяет доступ к какой-либо информации только отдельным пользователям, открытый – только зарегистрированным пользователям, публичный – всем. Вопрос о характере доступа к конкретной информации должен согласовываться с заинтересованными организациями, прежде всего органами ЧС. Отметим, что процедура регистрации пользователей также является необходимым элементом организации работы геопортала.

В основе построения геопортала лежит система управления реляционными базами данных Microsoft SQL Server. В качестве Web-ГИС технологии пока используется только Геомиксер, разработанный российской фирмой СКАНЕКС, но уже в ближайшем будущем будет осуществлен переход на технологии, находящиеся в свободном доступе и с открытым исходным кодом. Это обусловлено необходимостью решения проблем, связанных с лицензированием и тиражированием таких технологий при разработке ситуационных центров космического мониторинга.

Теперь определим, какие базы пространственных данных геопортала и с какой периодичностью необходимо постоянно актуализировать, чтобы обеспечить полноценную работу геопортала космического мониторинга чрезвычайных ситуаций в рабочем режиме. Для этого рассмотрим с этой точки зрения его структуру в настоящее время.

Кроме данных, относящихся к космическому мониторингу ЧС, на геопортале содержатся такие вспомогательные слои, как подложка, ветер и засуха. Подложка позволяет визуализировать данные мониторинга. Она представлена или картографическими данными, или рельефом, или космоснимками, включая Landsat. Слой «засуха» отражает текущее состояние растительности, а слой «ветер» - текущие и прогнозные данные по направлению и скорости ветра. Эти слои полезны для оценки потенциальной угрозы распространения пожаров.

Данные по ЧС структурированы по основным направлениям космического мониторинга ЧС: мониторинг снежного покрова, мониторинг ледового покрова, мониторинг паводков, мониторинг пожаров, нефтяные разливы. Мониторинг пожаров, в свою очередь, структурируется на мониторинг очагов пожаров, очаги крупных пожаров, мониторинг выгоревших площадей. Следующий структурный уровень во всех данных по ЧС образует год, а последний уровень - результаты космического мониторинга ЧС на конкретную дату или период времени (рисунок 1). При этом между годом и датой (периодом времени) в паводках может быть промежуточный уровень, который представляет собой наименование области или региона.

Сами данные последнего уровня представляются в виде, зависящем от права доступа к информации. В закрытом уровне доступа вся информация представляется в формате и объеме, соответствующим данным оперативного космического мониторинга (см. раздел 1), а в открытом и публичном - в упрощенном виде и объеме. В частности, для мониторинга схода снежного и ледяного покровов и прохождения паводковых вод во втором случае даются обзорные карты за восьмидневный период, а для пожаров - данные об очагах без дополнительной обработки и с ограниченной атрибутивной информацией.

По желанию пользователя с помощью курсора высвечивается атрибутивная информация по конкретному объекту ЧС (рисунок 1). Так, для очагов пожаров высвечивается дата съемки, время, наименование спутника, координаты. Дополнительно для закрытого уровня дается еще наименование ближайшего населенного пункта, азимут и расстояние между ними.

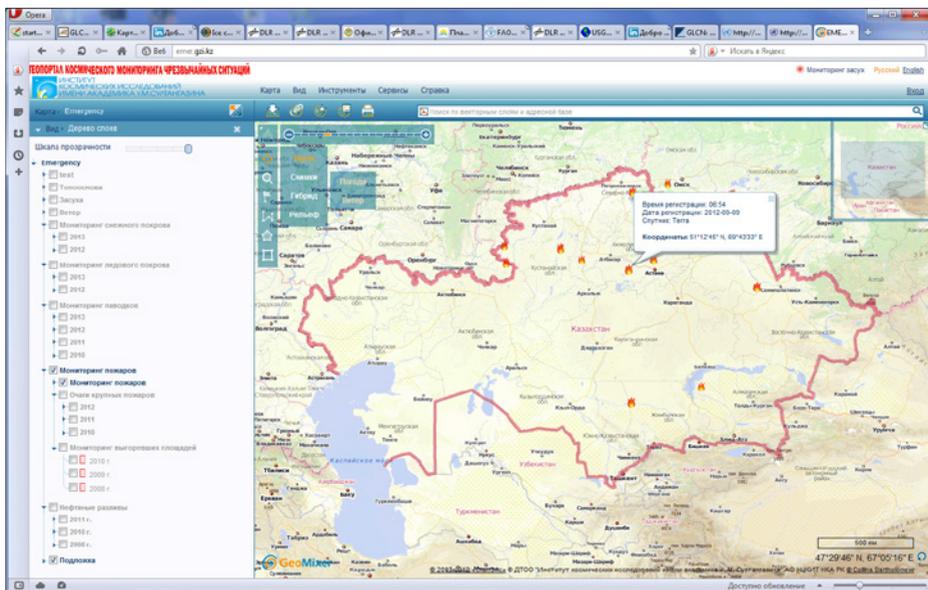


Рисунок 1 - Интерфейс страницы геопортала космического мониторинга ЧС

По результатам тематической обработки космоснимков формируются векторные слои, которые и загружаются на геопортал. Первоначально все процедуры выполнялись вручную, что занимало достаточно много времени. Затем технология загрузки в значительной степени была автоматизирована и теперь занимает 3-5 минут после получения векторных данных, которые нужно загружать на геопортал.

Полученное время актуализации баз пространственных данных геопортала космического мониторинга чрезвычайных ситуаций уже позволяет использовать

геопортал в качестве средства предоставления этих данных пользователю. Особое место в этих данных играют оперативные данные об очагах пожаров, которые занимают значительную часть всех пространственных данных на геопортале и являются наиболее востребованными в практической деятельности органов ЧС различного уровня.

Для этих данных была дополнительно модернизирована технология автоматизации загрузки данных космического мониторинга на геопортал. В частности, были автоматизированы две дополнительные процедуры:

- 1) выборка с полного пролета МОДИС очагов высоких температур, относящихся к Казахстану и приграничным с ней территориям, что уменьшает объем обрабатываемых данных и ускоряет процесс их обработки;
- 2) очистка вектора очагов пожаров от постоянных источников высоких температур, связанных, в основном, с промышленной деятельностью.

#### **4.3.3 Технология оперативного отображения прогнозных полей ветра на геопортале**

При оценке ситуации в районе расположения активных очагов пожаров важная роль принадлежит метеоданным, прежде всего, скорости и направлению ветра, так как они существенно влияют на дальнейшее развитие пожаров. При этом важно знать не только текущее значение, но и прогноз их развития в ближайшем будущем. Метеоданные представляют собой динамические внешние условия в районе расположения активных очагов пожаров. При более детальном прогнозировании развития пожаров, в частности при моделировании, необходимо также учитывать стационарные внешние условия, к которым относятся, прежде всего, характеристики подстилающей поверхности в районе реального или потенциального распространения пожаров

Существует несколько источников метеоданных. В настоящее время наиболее современные базируются на компьютерных моделях атмосферы, которые разрабатываются многими исследовательскими центрами и метеослужбами различных стран, используя современные возможности международной кооперации, Интернета, комплекса разнообразных метеоданных. Последний включает в себя данные, полученные с помощью наземных станций, самолётов, метеозондов, радаров, лидаров, спутников и т.д. В зависимости от пространственного масштаба атмосферные модели подразделяют на классы. Чаще всего выделяют глобальные, региональные и мезомасштабные модели.

В глобальных моделях рассматриваются атмосферные процессы планетарного масштаба. Наиболее известными такими моделями являются: Global Forecast System (GFS), разработанная в США, Unified Model (UM) метеослужбы Великобритании, GME службы погоды Германии и др. Шаг сетки в таких моделях достаточно крупный (несколько десятков км). Результаты моделирования, полученные в этих моделях, часто являются общедоступными через Интернет и повсеместно широко используются.

Для оперативного получения прогнозных метеоданных для геопортала выбираем систему GFS, которая управляется NCEP (National Centers for

Environmental Prediction), являющийся подразделением NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) США [9]. GFS модель обновляется четыре раза в день (00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 UTC) на 384 часа. Файлы с данными GFS, которые на данный момент предоставляются в открытом доступе для всей территории Земли, имеют разрешение в 0.5 градуса.

Рассмотрим теперь схему оперативного получения текущих и прогнозных метеоданных. Прежде всего, определим, какие данные необходимо нам скачивать. На главной странице сайта NCEP приводится достаточно большой список всех оперативных данных, которые имеются на сайте. Данные группируются по разрешению (0.5, 1, 1.25, 2,5 градуса), по структуре данных (таблица 2), по высоте представления (от поверхности Земли до верхних слоев атмосферы), по временному интервалу прогнозирования (от 00 (текущие) до 384 часов), по картографической проекции (longitude-latitude, Lambert Conformal) и т.п.

Уровень	Тип информации
0 м	Precipitable water (PWAT)
0 м	Давление
2 м	Q, T - температура воздуха
10 м	U/V- зональная и меридиональная составляющие скорости ветра
1000 mb	Z – геопотенциал
850 mb	RH – относительная влажность, T, U/V, Z
700 mb	Z
500 mb	RH, T, U/V, $\omega$ - вертикальная скорость
500 mb	Z (HGT)
300 mb	Z (HGT)
200 mb	T, U/V, Z

Таблица 2 - Интерфейс страницы с характеристикой информации, хранящейся в grib файлах NCEP (фрагмент)

Для оперативной загрузки на Геопортал, прежде всего, необходимы данные о скорости и направлении ветра у поверхности земли. Поэтому выбираем grib файлы, содержащие только информацию о скорости и направлении ветра на высоте 10 м (наименьшая высота в метеоданных). В настоящее время используются для вывода на геопортал метеоданные о ветре с прогнозом не больше чем 72 часов с интервалом 3 часа, которые регулярно обновляются по мере поступления новых данных. При проведении моделирования с GFS также скачиваются данные об осадках, температуре, давлении. Полученные данные подвергаются дальнейшей тематической обработке.

Как сказано выше, метеоданные с характеристиками ветра получают в формате GRIB (GRIdded Binary). Этот формат, официально утверждённый Всемирной метеорологической организацией, предназначен для эффективной передачи значительных объёмов метеорологической информации в реальном времени [10]. GRIB представляет собой формат битового типа, содержащий изменяющиеся во времени поля метеорологических физических величин,

значения которых приводятся в узлах некоторой сетки для определённого момента времени.

Дальнейшая задача состоит в преобразовании скаченных в grib формате данных с характеристиками ветра в векторный формат, который используется в ГИС-приложениях и загружается на геопортал. Алгоритм такого преобразования представлен на рисунке 2. После получения метеоанных происходит выделение из grib файлов метаданных, содержащих описательную информацию. Используя эту информацию, из grib файлов выделяются горизонтальные и вертикальные составляющие скорости ветра для территории Казахстана и прилегающих территорий. Вычисление скорости и направления ветра происходит по рекомендуемому алгоритму [11] на основе u-компоненты, описывающей поля ветра с востока на запад, и v-компоненты для полей ветра север-юг на высоте 10 м. от поверхности суши. Используя рассчитанные для каждой полуградусной зоны величины и направления ветра, формируются векторные поля ветра. Отметим, что все эти процедуры автоматизированы.



Рисунок 2 – Алгоритм формирования векторных полей ветра из grib данных

В результате обработки grib файлов получаем для территории Казахстана временной 72-часовой ряд векторных полей ветра с шагом полградуса по координатам поверхности и 3 часа по временной шкале. Этот временной ряд можно визуализировать в любой ГИС-системе, в том числе на геопортале. Тем

самым получается динамика развития поля ветра, в которой содержится ветровой градиент как по величине, так и по направлению.

Важнейшим ГИС-приложением полученного временного ряда является оперативное выставление этих данных на геопортал. В настоящее время на него загружаются данные о динамике поля ветра на текущие сутки с 6.00 до 24.00 по времени Астаны. При этом пользователь имеет возможность выбрать время, для которого можно загрузить данные о ветре и определить масштаб представления. Это может быть весь Казахстан или отдельный его регион (рисунок 3).

Очень важное значение для принятия правильных и оптимальных решений для распределения сил и средств, необходимых для ликвидации обнаруженных по ДДЗ пожаров, имеет прогноз развития активных очагов пожаров с учетом, как стационарных внешних условий, так и динамических внешних условий. К стационарным относятся, прежде всего, характеристики подстилающей поверхности в районе реального или потенциального распространения пожаров, а к динамическим – метеорологические параметры.

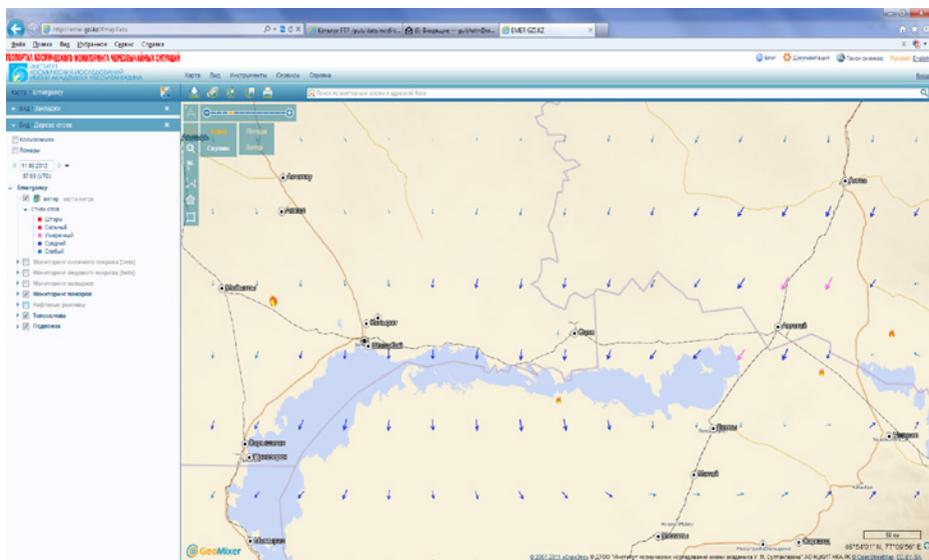


Рисунок 3 - Интерфейс страницы геопортала с полем ветра и очагами пожаров на 7.00 по времени UTC 11 июня 2012 года

При визуализации метео данных на геопортале вектор скорости ветра привязывается к середине полуградусной зоны, его направление на карте соответствует полученному значению, величина стрелки пропорциональна скорости ветра, цвет стрелки соответствует типу ветра, в который попадает величина скорости. В качестве интервалов градации ветра по типам ветра использованы следующие:

- Штормовые, скорость ветра больше 24 м/с.
- Сильные, скорость ветра лежит в интервале 10-24 м/с.

- Умеренные, скорость ветра лежит в интервале 8-10 м/с.
- Средние, скорость ветра лежит в интервале 5-8 м/с.
- Слабые, скорость ветра меньше 5 м/с.

Типы ветра видны при включении опции «стили слоя».

Наибольшее значение из всех динамических параметров для оценки потенциального развития пожаров имеют скорость и направление ветра. Поэтому, в первую очередь, была разработана технология загрузки этих метеоданных на геопортал. Поля ветра, загруженные на геопортал, позволяют оценить возможное направление распространения пожара. Для этого загружают одновременно вектора скорости и вектора очагов пожаров (рисунок 3). Анализируя ветровое поле в окрестностях пожара, можно определить вероятное направление распространения пожара, а сила ветра позволяет оценить хотя бы качественно потенциальную скорость распространения пожара.

Для того чтобы автоматизировать и конкретизировать процесс оценки ветровых характеристик в районе расположения очагов пожара, был разработан и автоматизирован алгоритм получения прогнозных данных поля ветра в районе их расположения активных очагов пожаров (АОП), схема которого представлена на рисунке 4. В ГИС загружаются векторные слои поля ветра и очагов пожаров. Затем с помощью специальной программы определяются ближайшие к очагам пожаров значения вектора ветра, которые считываются и передаются в программу, формирующую выходную атрибутивную таблицу с характеристиками очагов пожаров.

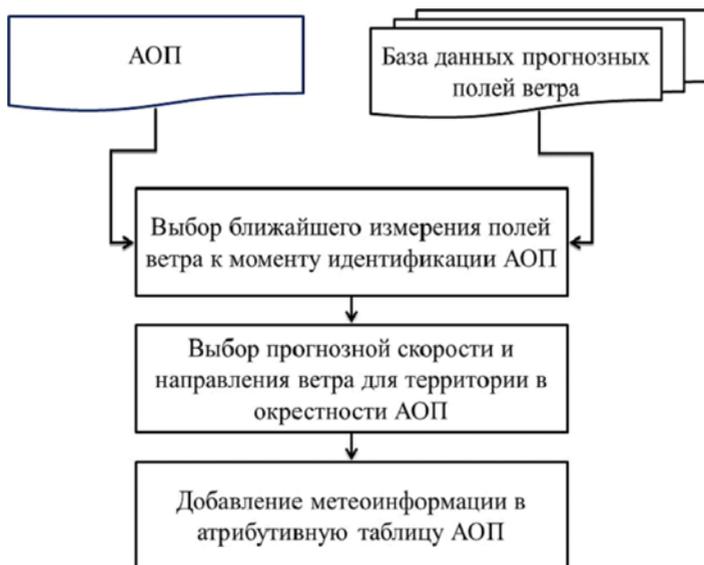


Рисунок 4 - Алгоритм оперативного получения прогнозных данных поля ветра в районе расположения АОП

Для верификации полученной технологии расчета направления ветра проведено сравнение прогнозного направления ветра, полученного на основе метеоданных GFS, и направления ветра, определяемого по направлению дыма от пожаров на текущих космических снимках Terra и Aqua MODIS. Сравнение, в целом, показало хорошие результаты, хотя иногда встречались и существенные расхождения. На рисунке 5 представлено сравнение направления реального (а) и прогнозного ветра (б) для пожара на побережье Каспийского моря 21 сентября 2012 г. в 14 часов местного времени. Как видим, достаточно хорошее совпадение.

#### 4.3.4 Перспективы развития космического мониторинга ЧС в Казахстане

1. Дальнейшее развитие космического мониторинга ЧС в Казахстане связывается с развитием геопортальных технологий и с созданием на базе их сети территориальных ситуационных центров космического мониторинга.

2. Эффективность космического мониторинга чрезвычайных ситуаций, особенно паводков, существенно повысится за счет более активного использования ДДЗ среднего, высокого и сверхвысокого разрешения, а также радарных данных. При этом вывод на орбиту казахстанских космических спутников ДЗЗ значительно повысит возможности использования таких данных.

3. Важная роль в развитии технологий космического мониторинга ЧС отводится формированию прогнозного блока, включающего блоки моделирования пожаров, паводков, наводнений и прорывов плотин.

4. Все более возрастает роль, особенно при возникновении ЧС крупного масштаба, использования возможностей международного сотрудничества как на межреспубликанском уровне с Россией, так и в рамках международных организаций, таких как Sentinel Asia.

**а**





Рисунок 5 - Сравнение направления реального (а) и прогнозного ветра (б) для пожара в Атырауской области 21 сентября 2012 года на 14.00 местного времени

### Список литературы

[1] *Spivak L.F., Arkhipkin O.P., Sagatdinova G.N.* Development of Fires Space Monitoring System in Kazakhstan // Proceedings of 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. Saint-Petersburg, 2005.

[2] *Архипкин О.П., Спивак Л.Ф., Сагатдинова Г.Н.* Пятилетний опыт оперативного космического мониторинга пожаров в Казахстане / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. // Сборник научных статей. Выпуск 4. Москва: ООО «Азбука-2000», 2007. - Т. 1. - С. 103-110.

[3] *Архипкин О.П., Сагатдинова Г.Н.* Развитие технологий оперативного космического мониторинга ЧС в Казахстане / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. // Сборник научных статей. Выпуск 5. Москва: ООО «Азбука-2000», 2008. - Т. 2. - С. 411-418.

[4] *Arkhipkin O.P., Sagatdinova G.N.* Functioning of Fires and Flood Space Monitoring System in Kazakhstan // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing 2008. pp. 435-439.

[5] *Архипкин О.П., Спивак Л.Ф., Сагатдинова Г.Н.* Развитие системы космического мониторинга пожаров в Казахстане в 2005-2007 годах // Космические исследования и эксперименты республики Казахстан (2005-2007 годы). Алматы: «Дайк-Пресс», 2008. - Т. 2. - С. 159-171.

[6] *Спивак Л.Ф., Архипкин О.П., Сагатдинова Г.Н.* Практика и перспективы космического мониторинга чрезвычайных ситуаций в Казахстане // Земля из космоса. Выпуск 4. Зима, 2010. - С. 14-22.

[7] *Arkhipkin O.P., Spivak L.F., Sagatdinova G.N.* Development of Flood Space

Monitoring in Kazakhstan / Geoscience and Remote Sensing New Achievements. Edited by Pasquale Imperatore & Daniele Riccio. ISBN 978-953-7619-97-8. Vukovar, Croatia: In Teach. 2010. pp. 419-436.

[8] *Lev Spivak, Oleg Arkhipkin, Gulshat Sagatdinova*. Development and prospects of the fire space monitoring system in Kazakhstan // *Frontiers of Earth Science*. 2012, 6(3). pp. 276–282.

[9] Global Forecast System - <http://www.emc.ncep.noaa.gov/index.php?branch=GFS>.

[10] What is GRIB- [http://www.weatheroffice.gc.ca/grib/what\\_is\\_GRIB\\_e.html](http://www.weatheroffice.gc.ca/grib/what_is_GRIB_e.html).

[11] Office of the federal coordinator for meteorological services and supporting research U.S. department of commerce // National Oceanic and Atmospheric Administration. Federal Meteorological Handbook No. 3. Rawinsonde and Pibal Observations. FCM-H3-1997. Washington, DC. May, 1997. Pp. D4 – D5.

#### 4.4 АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА СОДЕРЖАНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*Ахмеджанов А.Х., Исаков А.Н., Караданов Т.К.*

ДТОО «Институт космических исследований» имени академика  
У.М.Султангазина» АО «НЦКИТ»

Глобальные изменения климата являются одними из самых актуальных проблем современности. Последствия этих изменений могут привести к ухудшению среды обитания и природным катастрофам. Во многих регионах зафиксирован рост концентрации парниковых газов, что приводит к увеличению среднегодовой температуры за счет дополнительного поглощения инфракрасного излучения. В отдельных регионах баланс парниковых газов складывается по-разному из-за физико-географических особенностей территории [1-3].

На территории Казахстана измерения парниковых газов проводятся на наземных станциях, и они покрывают весьма незначительную часть территории Казахстана. Спутниковые измерения свободны от этих недостатков: проводятся систематически, охватывают всю территорию Казахстана и позволяют восстанавливать высотные распределения атмосферных парниковых газов. Поэтому вопрос определения высотного и территориального распределения атмосферных парниковых газов на основе космических данных является актуальным. В данной работе разработан алгоритм расчета содержания атмосферных газов с применением спутниковых данных инфракрасного излучения для дальнейшего исследования содержания атмосферных парниковых газов.

Мониторинг атмосферных газов проводится с помощью наземных инфракрасных и лимбовых микроволновых спектрометров на борту космических аппаратов. На спутнике AURA (NASA, США) находятся сенсоры TES [4], MLS и др., на спутнике AQUA (NASA, США) - AIRS [5] и MODIS, на спутнике ENVISAT (ESA) - SCIAMACHY [6], на спутнике METOP-A (ESA) - IASI [7], на спутнике GOSAT (JAXA, Япония) - TANSO-FTS [<http://www.gosat.nies.go.jp>]. Аналитическая система GIOVANNI: GES-DISC (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center) Interactive Online Visualization and Analysis Infrastructure объединяет данные со многих спутниковых систем. По данным сенсора TES/Aura, регистрирующего спектры поглощения ИК-диапазона в тропосферных слоях атмосферы, восстанавливаются вертикальные профили  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$  и др., доступные на сайте GIOVANNI за период 2004-2010 годы.

Появились теоретические методики и комплексы программ для количественного моделирования сложных многофакторных задач спектроскопии атмосферы (например, программы LOWTRAN, MODTRAN, FASCODE, различные информационные системы). Термическое зондирование атмосферы основывается на данных, получаемых многоканальными спектрорадиометрами среднего и низкого разрешения, регистрирующими тепловое излучение

атмосферы и подстилающей поверхности в различных спектральных диапазонах, позволяющие восстанавливать температурный профиль атмосферы с большей точностью и более точным высотным разрешением без использования априорной информации. Это дает возможность для численного моделирования физических параметров атмосферы с использованием температурных профилей для реальных экосистем. В настоящее время активно разрабатываются технологии дистанционного инфракрасного зондирования атмосферы для мониторинга термодинамического состояния и состава атмосферы Земли [8-13].

Развитие атмосферной инфракрасной спектроскопии привело к созданию баз данных детальной спектроскопической информации высокого разрешения по атмосферным газам (NITRAN [14], GEISA [15]). Накопление априорной информации по профилям температуры и концентраций оптически активных газовых составляющих атмосферы в базе TIGR [16], информационной системе BADC [<http://badc.nerc.ac.uk>] и др. способствуют прогрессу в дистанционном зондировании атмосферных газов:  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $O_3$ ,  $CH_4$ ,  $NxOy$ ,  $CO_2$  и т.д.

Для решения обратной задачи по определению вертикальных профилей и содержания в атмосферном столбе парниковых газов из спутниковых спектров необходимо располагать всей доступной априорной информацией о возможных вертикальных распределениях искомым газам, полном содержании в столбе или, хотя бы, приземных концентрациях. Поэтому важной составляющей глобального спутникового зондирования являются независимые прямые измерения в подспутниковых точках, как наземных, так и самолетных. Для определения искомым параметров атмосферы по спектрам теплового излучения атмосферы и подстилающей поверхности необходимо решать обратную задачу. Практическая реализация решения обратной задачи требует, как правило, наличия обширной базы априорной информации об искомым профилям, полученной с использованием прямых радиозондовых, самолетных и других измерений. Обратные задачи атмосферной оптики являются некорректными и поэтому при их численном решении используют различные методы регуляризации: статистической [17] и по Тихонову [18].

Методы решения задач атмосферной оптики основываются на минимизации определенного вида целевой функции. Для минимизации используются обычно либо метод Ньютона, либо метод Левенберга-Марквардта, который представляет собой сочетание метода Ньютона и метода градиентного спуска. Размерность задачи можно уменьшить, если представить атмосферные профили в виде разложения по собственным векторам корреляционной матрицы априорных профилей. Ограничивая ряд разложения несколькими первыми членами и, сводя задачу к нахождению коэффициентов разложения, можно понизить размерность задачи. Это аналогично поиску решения на множестве гладких функций, как это делается в случае регуляризации по Тихонову. Методы регуляризации широко применялись для многоканальных спектрорадиометров с небольшим числом спектральных каналов, когда число неизвестных (количество определяемых параметров) превышало количество уравнений задачи (число используемых спектральных каналов). В этом случае задача была изначально вырожденной

(неоднозначной) и использование любой априорной информации об искомым параметрах было крайне необходимо. С появлением на орбите спектрометров среднего спектрального разрешения ( $\sim 0.1 \text{ см}^{-1}$ ) обратная задача стала существенно переопределенной, т.е. количество информативных спектральных каналов (число уравнений), как правило, на порядок-два превышает число искомым (неизвестных) параметров атмосферы. Поэтому в некоторых случаях стало возможным практически отказаться от регуляризации и для решения обратной задачи использовать минимизацию квадратичной невязки измеренных и расчетных спектров методом наименьших квадратов с ограничениями, без привлечения дополнительной априорной информации об искомом решении.

Вычислительная трудность решения обратных задач для определения искомым профилей из инфракрасных спектров атмосферы высокого разрешения обусловлена большой размерностью обратной задачи: в пространстве измерений – число спектральных каналов, в пространстве решений – число узлов высотной сетки, умноженное на число восстанавливаемых вертикальных профилей. Практическая реализация алгоритмов решения таких обратных задач для массовой обработки спутниковых спектров требует значительных вычислительных ресурсов и времени.

Для решения обратной задачи необходима предварительная работа по выбору подходящего диапазона в спектре. Коэффициенты поглощения и концентрация озона  $O_3$  вычисляются в спектральном диапазоне  $1040-1070 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует 30 каналу (9,58-9,88 мкм) сканера MODIS/AQUA. Выбранные диапазоны спектров поглощения позволяют рассчитывать концентрацию озона с наименьшими временными потерями и наибольшей точностью.

Для территории Западного Казахстана выбирались измеряемые данные MODIS/AQUA (февраль 2012 года) спектральной интенсивности уходящего длинноволнового излучения (радианса)  $[\text{Вт}/(\text{м}^2\text{мкм ср})]$ .

По спутниковым данным спектрометра AIRS/AQUA вычислялись средние по сезонам (зима-лето) за 2012 год температурные профили в барической системе координат. При этом оказалось, что в каждом рассматриваемом случае температурные профили для весеннего и осеннего сезонов расположены приблизительно на равном расстоянии от температурных профилей для зимнего и летнего сезонов. Разброс  $(t_{\text{зима}} - t_{\text{лето}}) / t_{\text{зима}} * 100\%$  профилей в диапазоне высот 250-750 гПа составляет 6-8%, с приближением к поверхности Земли разброс постепенно увеличивается до 12-20%, разброс профилей, обусловленный территориальными различиями выбранных участков, составляет 1-2% для высот 250-750 гПа и около 8% у поверхности Земли.

Решение уравнения переноса инфракрасного излучения от земной поверхности может быть представлено в следующем виде:

$$J_v(z) = \sigma_v B_v(T(z_0)) \exp\left(-\frac{\tau_{0v}}{\cos v}\right) + \int_0^z B_v(T(u)) \frac{\partial}{\partial u} \exp(\tau_v(u) / \cos v) du \quad (1)$$

с граничными условиями,  $J_v(z_0) = \sigma_v B_v(T(z_0))$ ,  $J_v(H) = J_{v\text{спутник}}$

где  $J_v(z)$  – уходящее инфракрасное излучение,  $\sigma_\lambda$  – коэффициент серости излучаемой поверхности,  $B_v$  – функция Планка,  $T$  – температура,  $z_0$  – уровень земной поверхности,  $\tau_{0v}$  – общее значение оптической толщины атмосферы,  $\nu$  – значение угла зондирования,  $\nu$  – волновое число,  $J_{v\text{спутник}}$  – измеряемое на спутнике уходящее излучение.

Для удобства решения задачи восстановления сигнала уходящего излучения представим уравнение (1) в дифференциальном виде

$$\frac{\partial J_v}{\partial z} = B_v(T(u)) \frac{\partial}{\partial u} \exp\left(-\frac{\tau_v(u)}{\cos \nu}\right) \quad (2)$$

с граничными условиями,  $J_v(z_0) = \sigma_v B_v(T(z_0))$ ,  $J_v(H) = J_{v\text{спутник}}$

Оптическая толщина атмосферы  $\tau_v(z)$  связана с коэффициентом объемного поглощения  $k_v$  следующим образом:

$$\tau_v(z) = \int_0^z k_v du \quad (3)$$

Моделирование объемного коэффициента поглощения (ОКП) излучения основано на использовании лабораторных спектров высокого разрешения ( $0,01 \text{ см}^{-1}$ ) изучаемых газов, зависимости спектра поглощения от сорта газа, температуры, давления, объемной концентрации газа в смеси [17]. Для приведения смоделированного спектра высокого разрешения к спектру, регистрируемому реальным сенсором низкого разрешения, используется стандартная численная процедура свертки спектра (конволюция), основанная на использовании аппаратных функций сенсора [18,19]. На основе спектрометрической базы данных HITRAN рассчитывается спектральный объемный коэффициент поглощения ИК-излучения данного вида атмосферного газа для реальных сезонных температурных профилей над выделенной территорией Западного Казахстана [20]. При наблюдении атмосферы со спутника в надир выражение для спектральной плотности яркости атмосферы в общем случае в условиях чистого неба имеет вид [18-19]:

$$I_v^\uparrow = \varepsilon_v B_v(T_0) \exp\left(-\int_0^H k_v^{abs} dh\right) + (1 - \varepsilon_v) I_v^\downarrow \exp\left(-\int_0^H k_0^{abs} dh\right) + \int_0^H k_v^{abs} B_v \exp\left(-\int_h^H k_v^{abs} dh'\right) dh \quad (4)$$

где  $k_\nu^{abs}$  - коэффициент поглощения компонентами атмосферы,  $B_\nu$  - спектральная плотность яркости черного тела,  $\varepsilon_\nu$  - излучательная способность земной поверхности,  $H$  - верхняя граница атмосферы,  $I_\nu^\downarrow$  - спектральная плотность энергетической яркости атмосферы в направлении земной поверхности:

$$I_\nu^\downarrow = \int_0^H k_\nu^{abs} B_\nu \exp\left(-\int_0^h k_\nu^{abs} dh'\right) dh \quad (5)$$

Коэффициент поглощения включает в себя: 1) коэффициент поглощения газовыми составляющими, который вычисляется с помощью суммирования по спектральным линиям (line-by-line) с использованием параметров известной спектральной базы данных HITRAN; 2) коэффициент ослабления аэрозольными компонентами атмосферы; 3) коэффициент континуального поглощения водяным паром:

$$k_\nu^{abs} = k_\nu^{gas} + k_\nu^{aerosol} + k_\nu^{cont}$$

Для безоблачной и слабоаэрозольной атмосферы можно ограничиться только  $k_\nu^{gas}$ :

$$k_\nu^{gas}(z) = N_0(z) \sum_{i=1}^{N_g} C_i(z) \sum_k r_{ik}(z) \sum_j S_{ijk}(T(z)) \Phi_{ijk}(\nu_{ijk} - \nu, T(z), p(z)), \quad (6)$$

где  $p(z)$   $T(z)$   $N_0(z) = p(z) / (k_b T(z))$  - давление, температура и концентрация молекул газов в смеси на высоте  $z$  соответственно,  $C_i(z)$  - относительная концентрация  $i$ -го газа,  $r_k(z)$  - т.н. распространенность  $k$ -го изотопа  $i$ -го газа,  $S_{ijk}$  - интенсивность  $j$ -й спектральной линии,  $\Phi_{ijk}$  - контур линии. Если известно вертикальное распределение относительной концентрации  $i$ -го газа, то общее содержание рассматриваемого газа  $D$  в атмосферном столбе высотой  $H$  определяется интегрированием  $C_i(z)$  по высоте:

$$D = \int_0^H C_i(z) dz \quad (7)$$

В расчетном профиле коэффициента поглощения излучения озоном выявляется максимум на высоте 50 гПа (20-25 км). Это так называемый озоновый слой, защищающий земную атмосферу от ультрафиолетового излучения.

Для нахождения относительной концентрации  $i$ -го газа  $C_i(z)$  в выбранном

диапазоне волновых чисел необходимо последовательное решение уравнений (2-4). На основе стандартного (среднего многолетнего) среднеширотного профиля концентрации определенного газа вычисляется объемный коэффициент поглощения, а затем восстанавливается значение уходящего сигнала на высоте спутника. Если это значение отличается от фиксируемого сигнала на спутнике больше заданного значения отклонения, то цикл продолжается. На каждом цикле добавляется или убавляется предыдущее значение относительной концентрации на достаточно малое отклонение, пересчитывается объемный коэффициент поглощения и восстанавливается значение уходящего сигнала. Процедура продолжается до достижения необходимой точности отклонений расчетного значения уходящего излучения от измеряемого на спутнике сигнала.

Расчетное содержание озона в атмосферном столбе на территории Западного Казахстана в феврале 2012 года в единицах Добсона представлено на рисунке 1, которое удовлетворяет данным сенсора AIRS/ AQUA (рисунок 2). Расчетное содержание метана в атмосфере (рисунок 3) удовлетворительно описывает его распределение (рисунок 4) по данным спутникового зондирования.

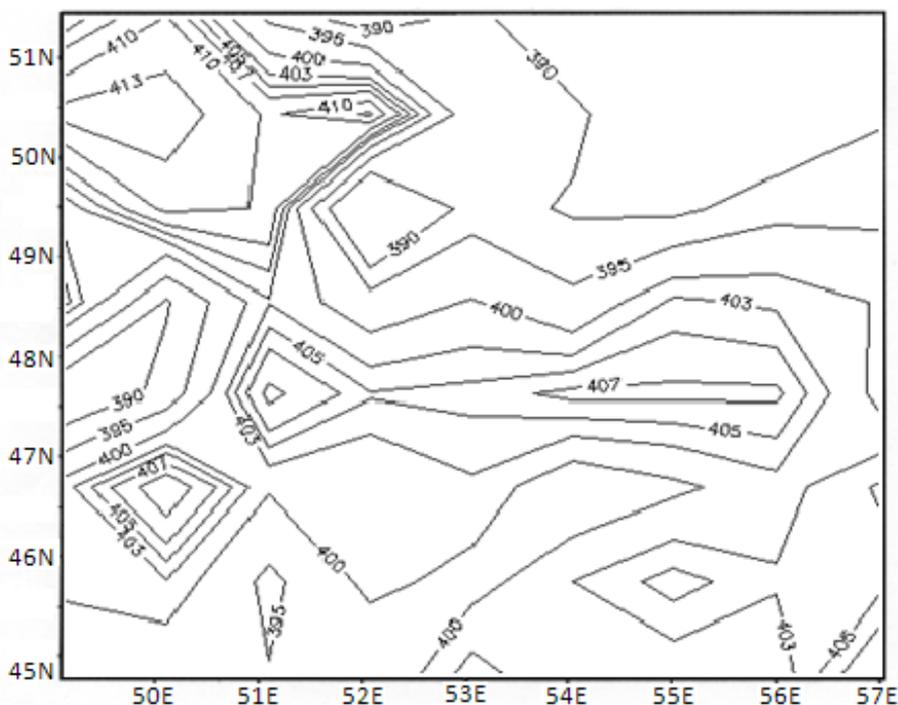


Рисунок 1 - Расчетное содержание озона в атмосферном столбе на территории Западного Казахстана в единицах Добсона в феврале 2012 года

AIRX3STM.005 Total column ozone descending (TotO3\_D) [Dobson units]  
(Feb2012)

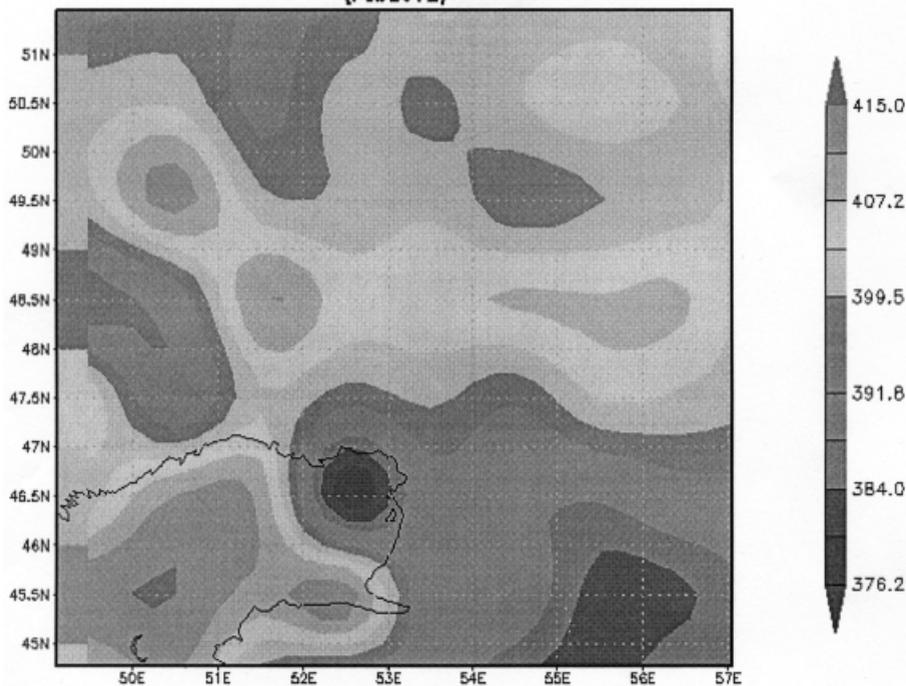


Рисунок 2 - Содержание озона по данным AIRS в единицах Добсона  
в феврале 2012 года на территории Западного Казахстана

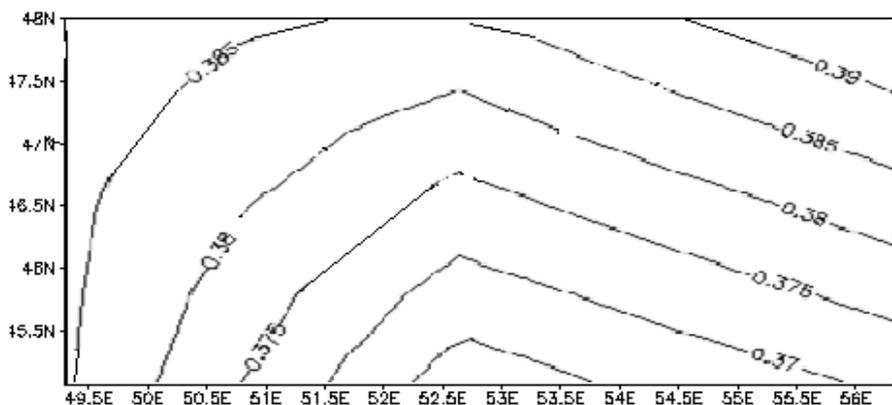


Рисунок 3 - Расчетное содержание метана в атмосферном столбе ( $*1020 \text{ mol/cm}^2$ )  
на территории Западного Казахстана в марте 2010 года

TL3CH4D.002 CH4 Total Column Density (Nadir) [molecules/cm<sup>2</sup>]  
(03Mar2010 - 18Mar2010)

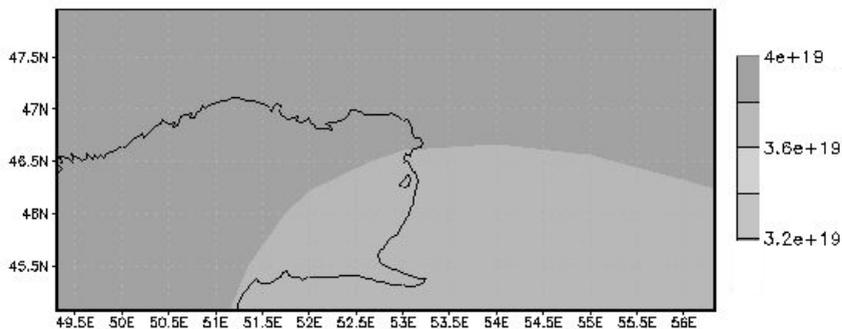


Рисунок 4 - Содержание метана в атмосфере на территории Западного Казахстана в марте 2010 года данным сенсора ТЕС

На основе банка данных спектрометрических параметров атмосферы разработана методика расчета коэффициентов поглощения инфракрасного излучения атмосферными газами. Получены вертикальные профили объемного коэффициента поглощения ИК-излучения озоном над территорией Западного Казахстана. Этот способ расчета вертикального профиля относительной концентрации атмосферных газов может быть применен для различных территорий, для которых имеются спутниковые данные измерений уходящего ИК-излучения. По вертикальным профилям относительной концентрации атмосферных парниковых газов рассчитываются значения содержания газов в атмосферном столбе на основе данных космического зондирования. Результаты расчетов содержания озона в атмосферном столбе удовлетворительно согласуются со спутниковыми данными. Результаты расчетов относительной концентрации атмосферных парниковых газов по рассматриваемому алгоритму позволяют рассчитывать содержание парниковых газов в атмосферном столбе на основе данных космического зондирования.

### Список литературы

- [1] *Голицын Г.С., Гинзбург А.С.* Оценки возможности «быстрого» метанового потепления 55 млн. лет назад // Доклады РАН. 2007. Т. 413. №6. С. 816-819.
- [2] *Горшков В.Г.* Физические и биологические основы устойчивости жизни. М. 1995. 470 С.
- [3] *Жилиба А.И., Кудинов А.Н., Тищенко А.П.* Оценка близости экосистем к состоянию катастрофы // ТвГУ. Ученые записки. 1996.Т. 1. С. 25.
- [4] *Beer R., Glavich T.A., Rider T.M.* Tropospheric emission spectrometer for Earth Observing System's Aura satellite // Applied Optics. 2001. V. 40. № 15. P. 2356.
- [5] *Parkinson C.L.* Aqua: an Earth-Observing Satellite mission to examine water and other climate variables // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions. 2003. V. 41. № 2. P. 173-183.

[6] *Burrows J.P., Hülzle E., Goede A.P.H., et al.* SCIAMACHY- Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography // *Acta Astronautica*. 1995. V. 35. No. 7. P. 445.

[7] *Javelle P.* IASI instrument overview // *Procs. of the 5th Workshop on ASSFTS*, 1994, Nov.30th - Dec.2nd, Tokyo, Japan. P. 1-20.

[8] *Sobrino J.A.* Land surface temperature retrieval from thermal infrared data: An assessment in the context of the Surface Processes and Ecosystem Changes Through Response Analysis (SPECTRA) mission // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. D16103. DOI:10.1029/2004JD005588

[9] *Smith W.L., Revercomb H., Zhou D.K., Huang H.-L.A.* Hyperspectral sounding: a revolutionary advance in atmospheric remote sensing // *SPIE*. 2005. V. 5655. P. 1-11.

[10] *Smith W.L., Woolf H.M., Revercomb H.* Linear simultaneous solution for temperature and absorbing constituent profiles from radiance spectra // *Applied Optics*. 1991. V. 30. № 9. P. 1117–1123.

[11] *Smith W.L., Woolf H.M., Hayden C.M., et al.* The TIROS-N operational vertical sounder // *Bull. Amer. Met. Soc.* 1979. V. 60. P. 1177–1187.

[12] *Smith W.L., Woolf H.M.* The Use of Eigenvectors of Statistical Covariance Matrices for Interpreting Satellite Sounding Radiometer Observations // *J. Atmospheric Sciences*. 1976. V. 33. № 7. P. 1127–1140.

[13] *Zhiliba A.I.* Limiting sensitivity of absorption spectrometer // *Proceedings SPIE*. 1991. V. 1811: Highly Resolution Molecular Spectroscopy. P. 415-418.

[14] *Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., et al.* The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // *JQSRT*. 2009. V. 110. P. 533-572. doi:10.1016/j.jqsrt.2009.02.013.

[15] *Jaquinet-Husson N., Scott N.A., Chedin A., et al.* The GEISA spectroscopic database: Current and future archive for Earth and planetary atmosphere studies // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2008. V. 109. No. 6. P. 1043-1059.

[16] *Chevallier F., Morcrette J.J., Chedin A., Cheruy F.* TIGR-like atmospheric-profile databases for accurate radiative-flux computation // *Quart. J. of the Roy. Met. Soc.* V. 126. No. 563. P. 777-785. Part B.

[17] *Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Теоретические основы атмосферной оптики. - Санкт-Петербург, 2003. - 475 с.

[18] *Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Жуков А.П. и др.* Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. // Ч.1. MODIS / Вычислительные технологии.- 2007.-Том 12.- №2.- С.67-89.

[19] *А.А.Лагутин, Ю.А.Никулин, Ал.А.Лагутин* Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. // Ч.2. AIRS / Вычислительные технологии.- 2007.- Том 12.- №5.- С.78-102.

[20] *Ахмеджанов А.Х., Искаков А.Н.* Определение коэффициентов объемного поглощения инфракрасного излучения парниковыми газами // «Гидрометеорология и экология», Алматы, 2009, №2, С.72-77.

## 4.5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ И ОБВОДНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

*Муратова Н.Р.<sup>1</sup>, Батырбаева М.Ж.<sup>1</sup>, Витковская И.С.<sup>1</sup>, Алибаев К.У.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ДТОО «Институт космических исследований имени академика  
У.М.Султангазина» АО «НЦКИТ»

<sup>2</sup>ПК «Гипроводхоз»

Сегодня наиболее острыми в Казахстане являются проблемы мониторинга водных ресурсов и их использования в вододефицитных районах. Большинство рек, протекающих по территории республики, берут начало за рубежом. При этом возникают проблемы, связанные с защитой казахстанской части бассейнов, например, из-за чрезмерного потребления воды другой страной или из-за ухудшения экологии по вине соседнего государства. Уже сегодня Китай увеличил потребление воды у истоков реки Иртыш. В районе Урумчи подготовлены площади орошения на два миллиона гектаров без учета уже имеющихся 567 тысяч гектаров. Воды требует и активная добыча нефти и газа в месторождении Карамай. В связи с увеличившимися затратами воды казахстанские и российские специалисты прогнозируют, что уже через 15-20 лет Иртыш будет менее судоходной рекой. Не менее острые вопросы возникают на трансграничных реках Или и Сырдарья.

Для понимания общности и взаимосвязи природно-географических и антропогенных процессов в разных частях водосбора, принадлежащих соседним странам, необходима полная информация о геосистеме, включающей всю территорию трансграничного бассейна. Получение такой информации возможно только в том случае, если сопредельные государства связаны соглашением по регулированию использования и охране вод трансграничных рек и водоемов. Отсутствие подобных договоренностей вынуждает искать альтернативный метод изучения смежных территорий - независимый от политических взаимоотношений, который позволит в первом приближении создать современную информационную базу данных, осуществлять контроль и слежение за происходящими на всей водосборной территории изменениями, прогнозировать возможные варианты их развития в зависимости от водохозяйственной политики каждого сопредельного государства. Использование современных данных космической съемки обеспечивает такие преимущества, делая дистанционный контроль наиболее эффективным за счет регулярного мониторинга водных объектов и водопользователей, особенно в труднодоступных и удаленных районах.

Для достижения вышеуказанных целей Водный комитет МСХ РК в 2011 году инициировал трехлетнюю программу «Интегрированное управление водными ресурсами и повышение эффективности водопользования», в рамках которой разработан комплекс технологий космического мониторинга водных объектов, обводнительных систем и анализа водопотребления в трех трансграничных бассейнах - Арало-Сырдарьинском, Балхаш-Алакольском и Ертисском. Подготовлен

классификатор задач космического мониторинга русел трансграничных рек, озер и крупных водохранилищ, орошаемых массивов и магистральных каналов, решаемых с помощью данных дистанционного зондирования (ДДЗ) различного пространственного разрешения. В статье представлены основные результаты работ на примере тестовых участков и отдельных водных объектов на территории Казахстана.

### **1. Исследуемые объекты**

Для тестирования разработанных методик были выбраны следующие водные объекты в бассейне реки Сырдарья:

- 1) гидрокомплекс Шардаринского водохранилища;
- 2) Коксарайский противопаводковый регулятор.

Выбор тестовых участков обусловлен наличием наземных данных, позволяющих проводить сравнительный анализ спутниковой и наземной информации.

Шардаринское водохранилище, образованное в 1966 году, расположено на реке Сырдарья на территории Южно-Казахстанской области Казахстана. Основные функции водохранилища: сбор воды для орошения, выработка электроэнергии и защита от интенсивного паводка. До 90-х годов XX века приток воды в Шардаринское водохранилище почти полностью был сбалансирован пусками воды в низовья реки в любой период года. В особо многоводные годы осуществлялись сбросы воды в Арнасайское понижение. Такой режим полностью обеспечивал устойчивый баланс Арнасайской впадины, гарантирующей прием избытков воды из Шардаринского водохранилища.

В результате нарушений хозяйственно-экономических и межведомственных связей между бывшими союзными республиками изменился режим работы русловых водохранилищ, в том числе и Шардаринского. Причиной явилось то, что Кыргызская Республика перевела Токтогульское водохранилище на энергетический режим работы с накоплением летнего стока рек для последующей выработки электроэнергии в зимнее время. В результате из общего объема воды, предназначенного для Казахстана, почти 70% стало поступать в осенне-зимний период с образованием зимних паводков. Увеличился приток воды к Шардаринскому водохранилищу в зимний период, в результате чего стали возникать проблемы с пропуском повышенных зимних расходов воды в низовья Сырдарьи. Теперь под постоянной угрозой подтопления находятся населенные пункты, расположенные ниже по течению реки от водохранилища, в том числе областной центр г. Кызылорда.

В целях сезонного регулирования стока для ирригации и защиты от наводнений правительство РК приняло решение о строительстве Коксарайского противопаводкового контррегулятора (ККР) в 146 километрах от Шардаринского водохранилища на правом берегу реки Сырдарьи. Расчетная полезная емкость Коксарайского водохранилища составляет 2,5 км<sup>3</sup>. Строительство ККР было завершено в 2011 году. В Коксарай направляется часть расходов реки в течение зимних месяцев декабря - февраля и сбрасывается назад в начале весны. Таким образом, динамика стока в низовьях бассейна становится ближе к естественной

динамике.

## **2. Спутниковые данные**

При проведении мониторинга требования к космической съемке формируются с учетом характера исследуемого объекта и возможностей, представляемых источниками информации. Объективность материалов дистанционного зондирования, в первую очередь, зависит от пространственного разрешения данных космической съемки и определяется геометрическими размерами изучаемого объекта.

Одной из наиболее важных характеристик озер и водохранилищ является площадь водного зеркала, четко определяемая по спутниковым данным, характеризующая наполненность водоема и связанная с расходом воды в реке, питающей водоем.

Для определения многолетней и сезонной динамики заполнения Коксарайского противопаводкового контррегулятора и Шардаринского водохранилища использовались данные среднего разрешения спутника LANDSAT (сцены 154/31 и 155/31, соответственно; разрешение 30 м; каналы 4: 0,75-0,9 мкм и 5: 1,55-1,75 мкм) и низкого разрешения Тегга/MODIS (разрешение 250 м, каналы 3: 0,459-0,479 мкм и 4: 0,565-0,545 мкм), обработанные с помощью стандартных алгоритмов геометрической, радиометрической и атмосферной коррекции. Выбраны ежемесячные безоблачные снимки спутника LANDSAT за 1998, 2005-2011 гг.

Глобальный архив снимков LANDSAT содержит покрытие практически всей поверхности Земли, начиная с 80-х годов XX века по текущую дату, обеспечивая космическую съемку земной поверхности с различным пространственным и спектральным разрешением; снимки спутника MODIS представлены с 2001 года. Архивы космических изображений открыты для свободного доступа [1].

## **3 Информативность спутниковой съемки в задаче мониторинга водохранилищ**

### *Используемая методика*

Дешифрирование наземных природных и искусственных объектов по мультиспектральным снимкам основывается на различии их спектральных характеристик. Отражательная способность воды относительно низка в сравнении с растительным покровом и почвами. Растительный покров может отражать до 50% падающего излучения, почвы – 30-40%, доля излучения, отраженного водной поверхностью, не превышает 10% [2-4]. В связи с этим, методики объектного дешифрирования водных поверхностей (озер, водохранилищ, русел рек) основаны на высоком коэффициенте поглощения водой электромагнитного излучения в видимом диапазоне спектра.

Границы водных объектов определяются с детальностью, соответствующей разрешению использованной спутниковой съемки, при использовании автоматических алгоритмов классификации, например ISODATA [6]. Результатом проведения классификации является автоматизированное выделение классов,

соответствующих водным объектам. При возникновении проблем при распознавании объектов, связанных с засолением или наличием болотной растительности, применяется экспертная коррекция результатов автоматического дешифрирования.

Определение границ водных объектов по данным космической съемки возможно как в видимом диапазоне спектра, так и по распределениям вегетационного индекса NDVI, имеющего для водной поверхности отрицательные значения [5].

При сравнении границ водных объектов, детектированных по ДДЗ для различных дат космической съемки, определяются изменения площади водного зеркала и тенденции в этих изменениях.

Сезонные и межсезонные изменения водных зеркал естественных озер и искусственных водохранилищ являются косвенными индикаторами изменения стока воды в реке. При этом естественные озера, наполняемые за счет поступления речной воды, характеризуют сезонный и многолетний сток, а изменения зеркал искусственных водохранилищ наряду с изменением стока отражают режим функционирования водохранилища.

#### *Результаты космического мониторинга водохранилищ*

1. С помощью космических снимков достаточно просто определяются пространственные размеры (площадь, длина) различных водных объектов. Для целей мониторинга водохранилищ наиболее доступными и экономическими оправданными являются космические снимки LANDSAT. По данным среднего разрешения ежемесячно в течение года определялись площади водных зеркал для выявления сезонного режима наполнения водохранилищ.

Космический мониторинг Шардаринского водохранилища проводился по данным LANDSAT (сцена 155/31, разрешение 30 м) (рисунок 1).

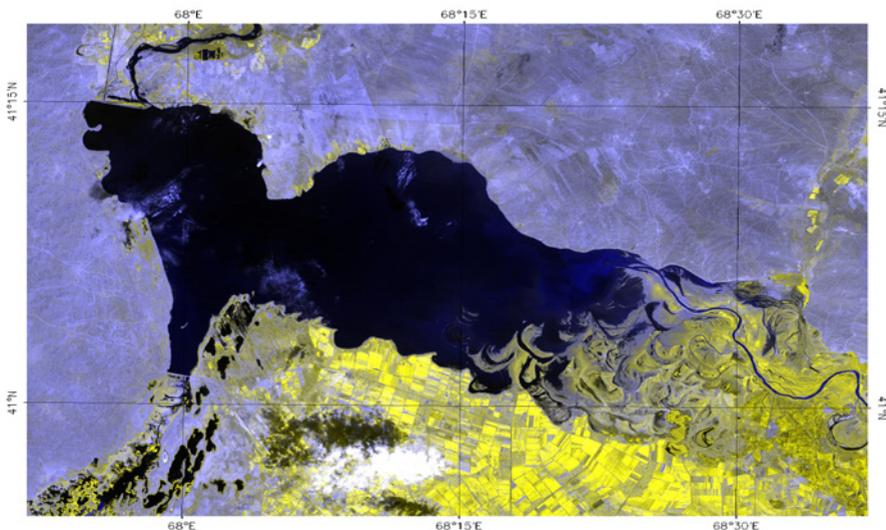


Рисунок 1 – Шардаринское водохранилище. Снимок LANDSAT (сцена 155/31, RGB композит 445; 7 августа 2008 года)

Изменение площади водной поверхности Шардаринского водохранилища в сезоне 1998 года по данным спутниковой съемки LANDSAT показано на рисунке 2.



Рисунок 2 – Динамика площади водного зеркала Шардаринского водохранилища в 1998 году по данным дистанционного зондирования

Данные спутниковой съемки подтверждают зимне-весенний режим сброса воды в реке Сырдарье:

- максимум наполнения по данным ДЗЗ отмечается в весенний период с дальнейшим уменьшением в летние месяцы;
- минимальная площадь зеркала наблюдается в октябре. Далее происходит наполнение водохранилища.

Графики многолетних изменений площади водной поверхности

Шардаринского водохранилища за период с 2005 по 2011 годов по спутниковой информации приведены на рисунке 3.

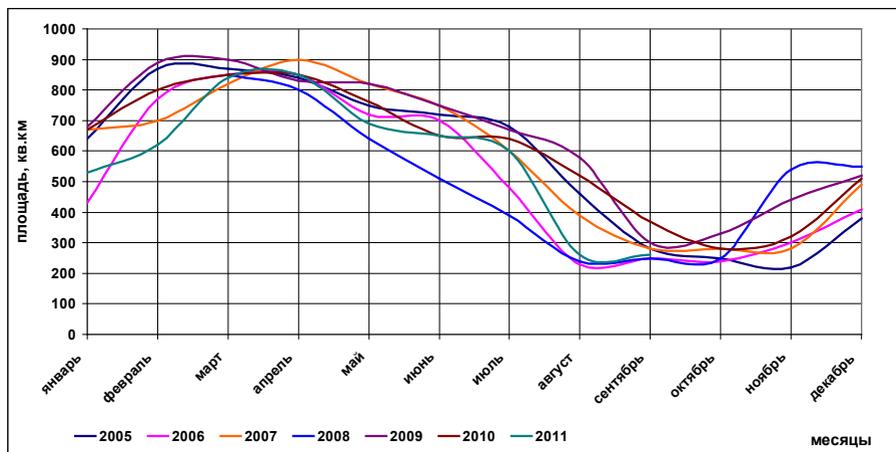


Рисунок 3 – Многолетние изменения площади водного зеркала Шардаринского водохранилища по спутниковым данным за период 2005 по 2011 гг.

Многолетняя динамика изменения площади водного зеркала Шардаринского водохранилища носит общий характер, согласующийся с наземными данными:

- 1) максимум заполнения отмечается в феврале-марте (для 2007 года в апреле – поздняя весна). Первые три месяца каждого текущего года являются месяцами самой большой приточности;
- 2) большие отводы воды, в основном для нужд орошения и возврата в реку для питания озерных систем в дельте, проводятся с мая по август, вызывая уменьшение площади водной поверхности водохранилища;
- 3) снижение отвода воды из водохранилища происходит в октябре-ноябре, приводя к минимуму заполнения;
- 4) последующее увеличение наполненности водохранилища связано с новым циклом в его работе.

Кривая режима наполнения водохранилища позволяет определить рекомендуемые периоды для космосьемки - зимний, зимне-весенний и осенне-зимний периоды. Немаловажный интерес представляет период образования льда в чаше водохранилища. Как показывает практика, в данном регионе происходит интенсивный процесс образования льда по реке Сырдарья и возникающие с ним проблемы.

Известные гидрологические характеристики Шардаринского водохранилища по данным наземных наблюдений связывают площадь зеркала с соответствующим объемом воды. На рисунке 4 приведены основные гидрологические характеристики Шардаринского водохранилища по данным наземных наблюдений.

#### Зависимость объема от площади зеркала Чардарьинского водохранилища .

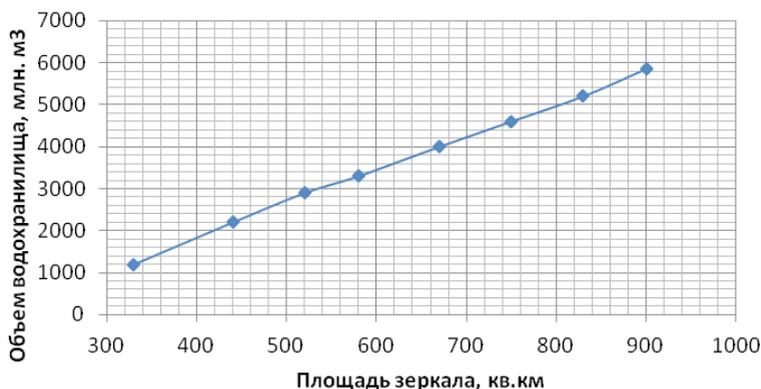


Рисунок 4 - Гидрологические характеристики Шардаринского водохранилища по данным наземных наблюдений

Установление подобных зависимостей позволяет применить спутниковые данные для оценки объемов воды в водоемах при определении водопотребления в любой момент времени по следующей схеме:

- 1) определение площади зеркала по данным ДЗЗ;
- 2) расчет объема воды по графику.

2. Ниже по течению реки Сырдарья от Шардары в 2008 году было начато строительство Коксарайского контррегулятора. Основными задачами нового водохранилища являются накопление излишков воды в зимне-весенний период для предотвращения нежелательных паводков на юге Казахстана и последующего равномерного спуска вниз по руслу Сырдарьи в ирригационный период на нужды орошения и пополнения запасов воды в пересыхающем Арале.

Ежегодная оценка объемов наполнения и сброса воды из Коксарайского контррегулятора (рисунок 5) с помощью космических снимков позволят проводить мониторинг использования водных ресурсов реки Сырдарьи.

Для каждого из 3-х лет наблюдения отмечается пик заполнения в апреле с последующим уменьшением (до ноября) площади водного зеркала в результате сброса воды в реку. Разные значения максимума площади зеркала в пике наполнения для различных годов связаны с постепенным вводом в действие ККР и увеличением принимаемых контррегулятором объемов воды.

Коксарайский контррегулятор - новое водохранилище, наибольшее наполнение происходит в зимне-весенний период. Учитывая его большую площадь, а также частоту получаемых снимков, рекомендуется проводить оценку его при полном заполнении (апрель месяц) и полном опорожнении (сентябрь месяц). Полученные данные позволят отслеживать объемы сбрасываемой воды из контррегулятора. С точки зрения практики эксплуатации контррегулятора,

учитывая его небольшую глубину, использование космических снимков позволяет оценивать происходящие процессы в чаше водохранилища.

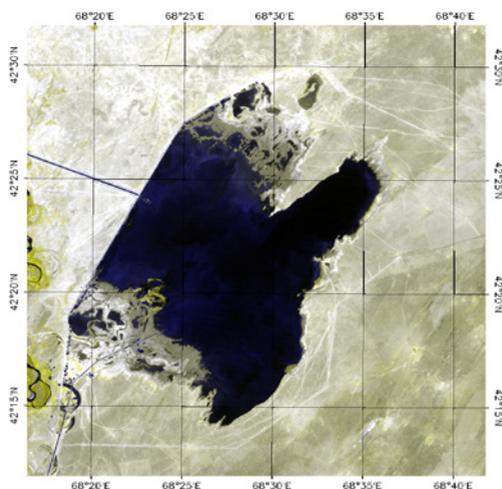


Рисунок 5 – Коксарайский контррегулятор. Снимок LANDSAT (сцена 154/31, 1 июня 2011 года)

Сезонные изменения площади водной поверхности Коксарайского водохранилища за период 2010-2012 гг. по спутниковой информации показаны на диаграмме 6.

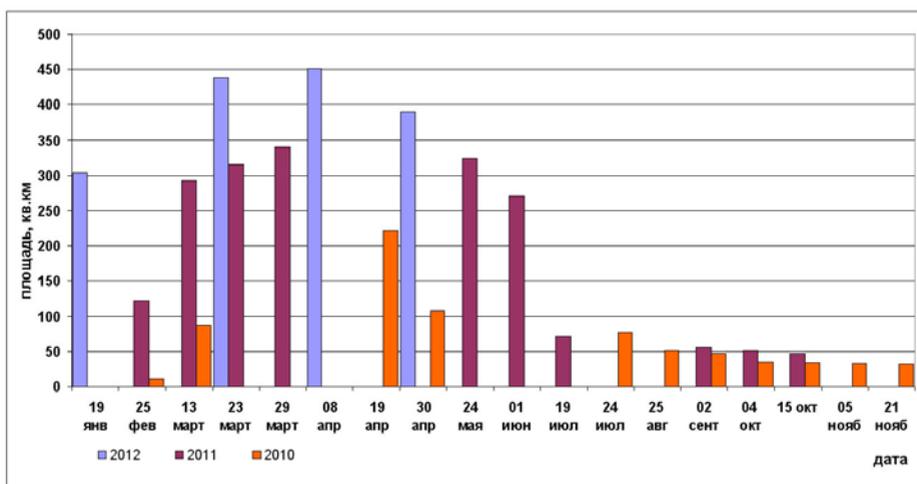


Рисунок 6 – Сравнительный анализ сезонной динамики площади водного зеркала Коксарайского водохранилища по данным ДЗЗ за 2010, 2011 и 2012 годы

На рисунках 7,8 приведены гидрологические характеристики, построенные по данным наземных наблюдений для Коксарайского водохранилища.

### Кривая площади Коксарайского контррегулятор

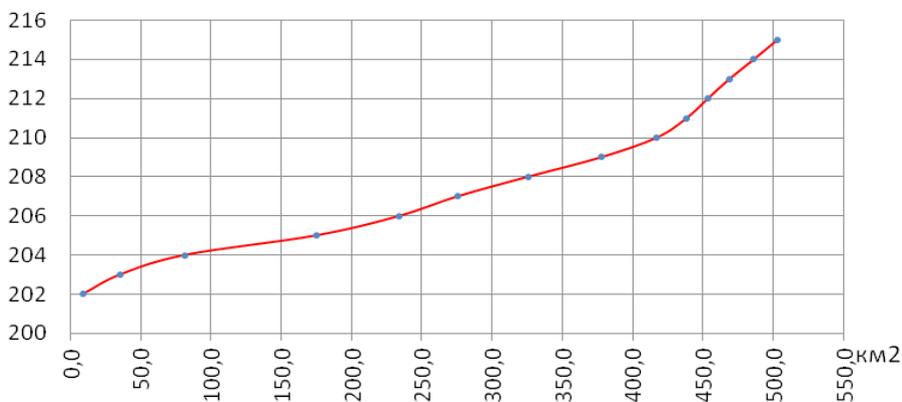


Рисунок 7 – Зависимости площади зеркала от уровня Коксарайского водохранилища по данным наземных наблюдений

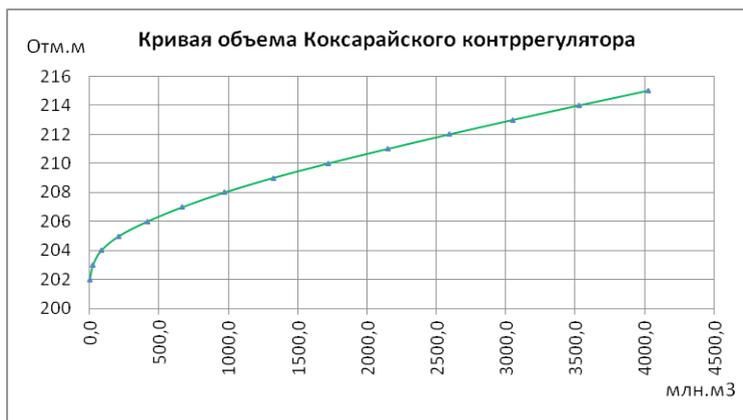


Рисунок 8 – Зависимости объема наполнения от уровня Коксарайского водохранилища по данным наземных наблюдений

По результатам космического мониторинга получены соответствующие оценки объемов воды в Шардаринском водохранилище в 2005-2011 гг. и Коксарайском контррегуляторе в 2010-2012 гг.

Таким образом, разработаны методики анализа сезонного режима водопользования водоемов на основе тематического дешифрирования космических снимков. Для тестирования разработанных методик выбраны опытные полигоны в бассейне реки Сырдарья на территории Казахстана, для которых имеются данные наземных измерений: Шардаринское и Коксарайское водохранилища. Проведен расчет объемов воды в выделенных водоемах по данным дистанционного зондирования.

Разработанные комплексы технологий космического мониторинга водных объектов, обводнительных систем и анализа водопотребления в бассейнах трансграничных рек будут применяться в рамках работ Комитета по водным ресурсам РК для контроля использования водных ресурсов и водопользования на территории сопредельных государствах.

### **Список литературы**

[1] <http://glovis.usgs.gov>

[2] *Чандра С., Гош К.* Дистанционное зондирование и географические информационные системы, 2008, Москва: Техносфера, 2008. – 312 с.

[3] *Абросимов А.В., Дворкин Б.А.* Использование данных ДЗЗ из космоса для мониторинга водных объектов // *Геопрофи*, 2009, вып.5, С.40-45.

[4] *Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И., Тутубалина О. В.* Аэрокосмические методы географических исследований. - М.: Академия, 2004. - 336 с.

[5] NDVI – теория и практика. - <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>

[6] *Kauth R.J. and Thomas G.S.*, “The Tasseled Cap - A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. // *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University of West Lafayette, Indiana, 1976, pp. 41-51.N 233.

## 4.6 КАРТИРОВАНИЕ КОРМОВЫХ УГОДИЙ ЮГА КАЗАХСТАНА ПО СОВРЕМЕННЫМ ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

*Муратова Н.Р., Бекмухамедов Н.Э., Кауазов А.М., Малахов Д.В.,  
Исламгулова А.Ф., Дегтярева О.В.*

ДТОО «Институт космических исследований имени академика  
У.М. Султангазина» АО «НЦКИТ»

Сегодня Правительство Республики Казахстан активно акцентирует внимание на проблемах животноводства. С учетом государственной программы «Форсированного индустриально инновационного развития Республики Казахстан на 2010-2014 годов» животноводство рассматривается в контексте перспективной отрасли экономики, призванной восстановить, в первую очередь, племенной скот, количество голов и, по сути дела, вернуться к высоким показателям производительности.

Казахстан обладает огромным потенциалом для эффективного развития животноводства. Республика занимает пятое место в мире по размерам пастбищных ресурсов и первое место по соотношению пастбищной площади к поголовью. В настоящее время обширные пастбищные ресурсы Казахстана используются далеко не полностью. Согласно статистическим данным из 187 млн. гектаров пастбищ используется 60 млн. га на землях сельскохозяйственного назначения (включая пастбища лесного фонда) и 21 млн. га на землях населенных пунктов. После уменьшения численности скота в переходный период и распада колхозов, выпас скота на отдаленных пастбищах в районах сократился с 11,2 млн. га до 2,8 млн. га в 2001 году, что фактически продолжается и до сегодняшнего дня. Чрезмерное стравливание, истощение природных пастбищ около сельских поселений и в густонаселенных местностях стало экологической проблемой, в особенности в юго-восточной части страны. Из 81 млн. га используемых пастбищ 26,5 млн. га деградированы.

Кроме того, следует отметить, что сегодня в Республике практически отсутствует система отгонного животноводства для эффективного использования пастбищ. В Казахстане 42 млн. га занимают пастбища, которые можно использовать круглый год. Большая часть их находится на юге и западе Казахстана, в долинах рек Или, Сырдарьи и Урала, а также в увлажненных песчаных массивах пустынной зоны. Восстановление системы отгонного животноводства позволит улучшить ситуацию с менее затратной для фермера кормовой базой и даст толчок для роста количества голов и продуктивности скота. Благоприятные природно-климатические условия и обширные площади земель сельскохозяйственного назначения должны бы стать огромным подспорьем для насыщения не только внутреннего рынка продукцией животноводства, но и для реализации ее на экспорт.

Для выработки предложений по вводу в оборот пастбищных земель необходимо предварительно провести инвентаризацию культурно-технического

состояния пастбищ в основных животноводческих областях Казахстана. На современном техническом уровне проблема получения информации о состоянии земной поверхности решается с применением дистанционных методов, позволяющих оперативно получать достаточно полный объем сведений о состоянии пастбищных экосистем на обширной территории республики. Сегодня космическому зондированию, как методу оперативного и масштабного мониторинга сельскохозяйственных угодий, практически нет альтернативы.

В рамках научно-исследовательских работ АО «Казагроинновация» по проекту «Разработка технологии космического и наземного мониторинга эколого-мелиоративного состояния пастбищных территорий» разработаны дешифровочные признаки идентификации растительности пастбищных угодий по данным космической съемки для оценки их стрессового состояния и количественного учета продуцируемой биомассы с проверкой их достоверности на тестовых участках южных областей Казахстана и экстраполяцией на другие территории.

#### **4.6.1 Исходные данные**

Проведение картирования и оценки состояния кормовых угодий южных областей Казахстана, в первую очередь, предполагало создание геоинформационной системы (ГИС) для каждой из областей для решения проблемы сбора, обработки, хранения и анализа информации, требующей определенной формы систематизации описаний и специфической базы данных. В качестве основной проекции для работы была выбрана проекция UTM с 41-ой по 44-ую зоны с эллипсоидом WGS-1984. ГИС была наполнена топографическими картами масштаба 1: 500 000, содержащими информацию по административным границам области, гидрографической сети, населенным пунктам и дорожной сети. Дополнительно с карт масштаба 1: 200 000 были оцифрованы слои водных источников («колодцы» и «источники») с указанием в атрибутивной таблице солености вод.

В ходе исследований использованы космические снимки различного пространственного разрешения. Критерии выбора спутниковых данных были сформулированы для решения конкретных задач картирования кормовых угодий на территории южного Казахстана. Данные космической съемки должны иметь широкий охват одной сценой, что обусловлено размерами района исследования; иметь высокую периодичность, так как в данном регионе высока доля облачных дней; иметь пространственное разрешение не более 300 м, а для задач картирования границ угодий – не более 30м; а также наличие спектральных каналов в ближнем инфракрасном (БИК) и видимом диапазонах, так как основным объектом исследований является растительный покров. Всем обозначенным критериям отвечали следующие спутниковые данные:

- 1) Landsat с разрешением 30м и периодичностью надирной съемки 16 суток для анализа, картирования и оценки экологического состояния пастбищ;
- 2) Terra/MODIS с разрешением 250 м и периодичностью съемки 2 раза в сутки для оценки кормозапаса пастбищных территорий.

Кроме того, для оценки условий вегетации и состоянием снежного покрова использовались данные со спутника NOAA/AVHRR.

Картирование кормовых угодий и антропогенной нарушенности земель осуществлялось в масштабе 1:1 000 000 в программном продукте ArcGIS 9.3 путем экспертного дешифрирования полных покрытий космическими снимками Landsat 2010 года. Для заполнения информации о контурах (выделов легенды) использовались данные из ряда источников [2-5], а также данные собственных подспутниковых исследований. На рисунке 1 представлен пример совмещения космических снимков и карты кормовых угодий 1978 года выпуска масштаба 1:1 500 000, которая предварительно была сканирована, геопривязана и приведена в цифровой вид с занесением полной атрибутивной информации из легенды карты.

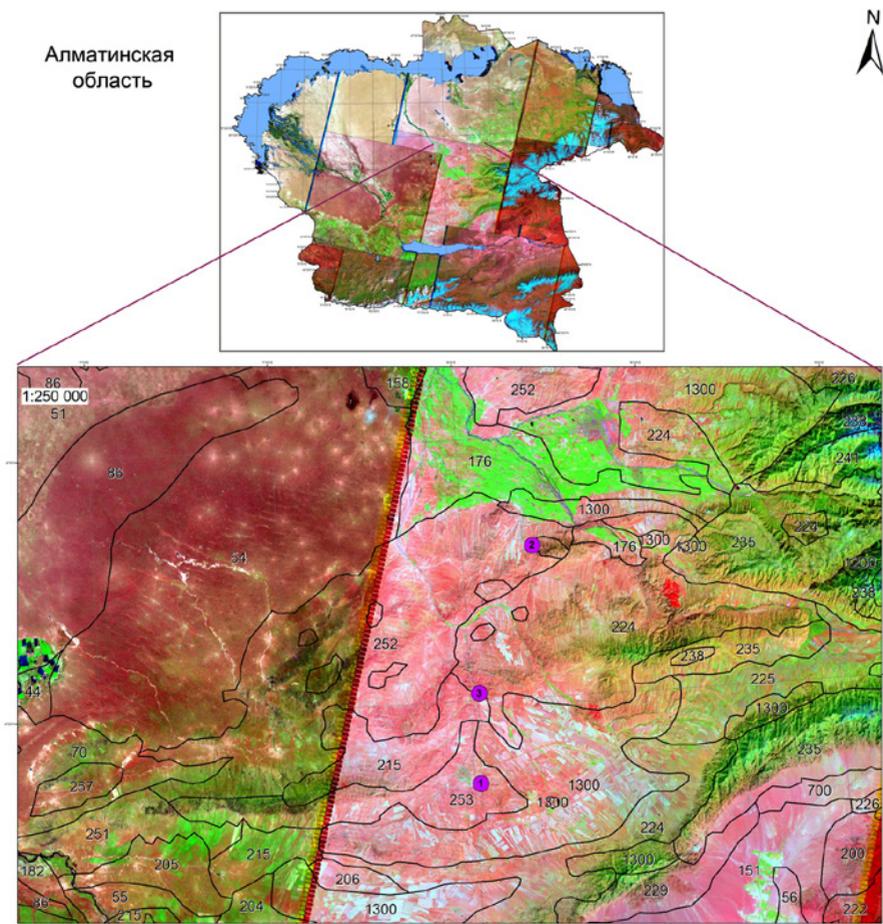


Рисунок 1 - Пример совмещения космических снимков и карты кормовых угодий 1978 года выпуска масштаба 1:1 500 000 для

Алматинской области

Дешифрирование космоснимков LANDSAT осуществлялось классическим (ручным) методом – выделением контуров по рисунку и фототону изображения. В ходе работ для каждой из 4-х областей созданы два вида карт в масштабе 1:750 000 – карта кормовых угодий и карта участков сильной деградации земель. Каждая карта существует в виде отдельного электронного слоя для удобства пользователей. Всего было выполнено 8 картографических моделей. На рисунках 2 и 3 представлены примеры карт для Алматинской области. К каждой карте имеется легенда с описанием контуров. Легенды к картам кормовых угодий выполнены по образцу и подобию легенды «Карты кормовых угодий» [2], для обеспечения преемственности данных и удобства работы традиционных целевых пользователей.



Рисунок 2 - Карта-схема кормовых угодий Алматинской области

Сложность распознавания растительных объектов на спутниковых снимках заключается в том, что в течение вегетационного периода в процессе роста и развития растения претерпевают значительные изменения. Изменения по годам и по сезонам также связаны с воздействием антропогенных факторов. Требуемая информация в необходимых объемах может быть получена только на основе совместной интерпретации данных дистанционного зондирования и наземных наблюдений и измерений.



Рисунок 3 – Карта-схема антропогенной нарушенности земель Алматинской области

Для установления достоверности, а также возможной корректировки созданных карт запланированы наземные исследования по основным типам пастбищной растительности.

### Список литературы

- [1] [http://tengrinews.kz/kazakhstan\\_news/okolo-50-millionov-gektarov-pastbisch-v-kazahstane-nahodyatsya-v-upadke-220604/](http://tengrinews.kz/kazakhstan_news/okolo-50-millionov-gektarov-pastbisch-v-kazahstane-nahodyatsya-v-upadke-220604/).
- [2] Карта кормовых угодий Казахской ССР. // М 1:1 500 000. - 1978.
- [3] Растительность Казахстана и Средней Азии (в пределах пустынной области). М 1:2 500 000. // Санкт-Петербург, 1995.
- [4] Рачковская Е.И., Волкова Е.А., Храмцов В.Н. Ботаническая география Казахстана и Средней Азии (в пределах пустынной области) // Санкт-Петербург, 2003. 425 с.
- [5] Топографические карты - М 1:200 000.

## **4.7 К ВОПРОСУ О КОСМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ФОРМИРОВАНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА**

*Кауазов А.М., Муратова Н.Р., Батырбаева М.Ж., Витковская И.С.,  
Тюрбаева С.И.*

ДТОО «Институт космических исследований имени  
академика У.М. Султангазина» АО «НЦКИТ»

Снег является естественным природным образованием и оказывает существенное воздействие на климат, условия жизни и хозяйственную деятельность человека. Большой интерес представляет снежный покров, как элемент климата и индикатор его изменения. В гляциологии и климатологии выделяют достаточно большое количество качественных и количественных параметров, характеризующих снежный покров с разных сторон. Наибольший интерес представляют только те из них, которые имеют прикладное значение. Одна из наиболее актуальных задач - это определение границы области устойчивого залегания снежного покрова. При этом важными характеристиками снежного покрова являются не только физические параметры (высота и плотность), но и климатологические, касающиеся дат установления и схода снежного покрова. Динамика схода снежного покрова в весенний период является косвенным показателем общего снегозапаса.

Вопросам мониторинга снежного покрова посвящено много работ. Вместе с тем, исследований процессов установления снежного покрова, встречается немного, что объясняется спецификой выпадения снежного покрова и сложностью проведения измерений. Традиционные наземные способы наблюдения за снежным покровом не обеспечивают требуемой точности информации по ряду объективных причин, главные из которых: редкая сеть метеостанций, пятнистость выпадения осадков, перенос снега ветром. Современный уровень развития средств дистанционного зондирования и методов исследования Земли из космоса, программных комплексов обработки космических данных и широкое распространение ГИС позволяют получить качественно новую информацию о состоянии территорий, объектах, процессах и динамике происходящих изменений. Данное исследование посвящено результатам космического мониторинга установления и схода снежного покрова в Казахстане.

### **4.7.1 Спутниковые данные для мониторинга снежного покрова**

Методы дистанционного зондирования основаны на том, что любой объект излучает и отражает электромагнитную энергию в соответствии с особенностями его природы. Различия в длинах волн и интенсивности излучения могут быть использованы для изучения свойств удаленного объекта без непосредственного контакта с ним.

В среднем, относительные излучательные способности естественных подстилающих поверхностей колеблются в пределах от 0,90 до 0,98. Снежный

покров по своим излучательным свойствам близок к классу диэлектриков и полупроводников. В любых условиях и при любой, даже самой низкой, температуре снежный покров излучает длинноволновую радиацию (поток собственного излучения снежного покрова). В то же время он непрерывно поглощает потоки длинноволновой радиации, идущие от других окружающих его тел [2]. Относительная излучательная способность снега составляет 0,995, т. е. снег очень близок к абсолютно черному телу. Несмотря на некоторое снижение излучательной способности снега по мере его старения, она остается самой высокой в сравнении с излучательной способностью других природных объектов. Снежный покров является, таким образом, самым совершенным в природе излучателем и поглотителем длинноволновой радиации, и, кроме того, самым совершенным отражателем прямой и рассеянной солнечной радиации [1, 2].

Наблюдение за снежным покровом в период его установления и схода по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) представляет собой весьма непростую задачу по причине облачных погодных условий [3]. Около 44% данных, полученных при помощи сенсора NOAA/AVHRR в осенний и весенний периоды, не могут быть использованы из-за плотной облачности. Из оставшихся данных не менее половины в той или иной степени неинформативны из-за наличия следов облачности. Таким образом, для произвольного элемента изображения лишь одна сцена из четырех или пяти дат несет достоверную информацию для последующего анализа, причем даты эти распределены неравномерно. Для безоблачных оптических снимков сравнение с данными наземных метеостанций показало высокую (около 95%) точность вычисления площади, покрытой плотным снежным покровом. При малой высоте снежного покрова (менее 5 см) по данным ДЗЗ в оптическом диапазоне наличие снега на изучаемой территории определяется с ошибкой, которая тем выше, чем меньше высота.

Для целей космического мониторинга снежного покрова с помощью всепогодной радиолокационной спутниковой съемки наиболее оптимальными являются данные в L-диапазоне с длиной волны более 20 см. Однако эти данные имеют узкую полосу обзора и сегодня являются дорогостоящими, что делает их фактически непригодными для мониторинга снежного покрова на больших территориях. В целом, радиолокационные данные пригодны лишь для обнаружения мокрого (тающего) снега. Для наиболее распространенного С-диапазона сухой снежный покров прозрачен.

Таким образом, для целей мониторинга снежного покрова на территории Казахстана из всего разнообразия видов данных ДЗЗ наибольший интерес, по совокупности достоинств (доступность, оперативность, полоса обзора, информативность и прочее), представляют две обзорные спутниковые системы сканерного типа - NOAA/AVHRR и TERRA/MODIS. Космические снимки обеих систем широко распространены и позволяют осуществлять ежедневный оперативный мониторинг. Основные характеристики радиометров AVHRR (NOAA) и MODIS (TERRA) приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение основных характеристик радиометров AVHRR (NOAA) и MODIS (TERRA)

Характеристика	MODIS	AVHRR
Количество спектральных каналов	36	5
Пространственное разрешение, м	250-1000	1100
Радиометрическое разрешение, бит/канал	12	10
Обзорность (ширина полосы съемки), км	2330	3000

Регулярные пролеты спутников обеспечивают данными космической съемки территории Казахстана до 5-6 раз в день. Пространственное разрешение и количество спектральных каналов достаточно для достижения целей оперативного мониторинга снежного покрова.

#### 4.7.2 Методика построения карт и обсуждение результатов

Физической основой распознавания снежного покрова является его высокая отражательная способность в видимом диапазоне и низкая излучательная способность в ИК-диапазоне, а также рост рассеивающих свойств сухого снега по мере снижения длины волны микроволнового излучения при радиометрических измерениях.

Выделяют количественные и качественные методы распознавания снежного покрова. Качественные методы основаны на визуальных дешифровочных признаках и в настоящее время практически не применяются. Количественные методы основаны на особенностях спектральных характеристик снежного покрова в оптическом и инфракрасном диапазонах спектра.

Существенное различие коэффициентов отражения снежного покрова и почвы в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах значительно упрощает распознавание снежного покрова. Однако заснеженная подстилающая поверхность имеет примерно такую же отражательную способность, как и облачность. Поэтому на снимках районы, покрытые снегом, по яркости почти не отличаются от районов, занятых сплошной или значительной облачностью. Распознавать снежный покров позволяют отличия их спектральных характеристик в инфракрасном диапазоне. Облака, как правило, имеющие низкую температуру в ИК-диапазоне, значительно темнее других объектов. Использование комбинации каналов в видимом и инфракрасном диапазонах позволяет эффективно отличать снег от прочих объектов на снимке.

На современных спутниках установлены сканирующие радиометры с возможностью измерений в широкой области спектра, включая 1,6 мкм, где снежный покров имеет очень низкую отражательную способность. Использование комбинации такого канала с каналом видимого диапазона привело к разработке алгоритма NDSI (Normalized Differential Snow Index - Нормализованный Дифференциальный Снежный Индекс) [4]. Для данных со спутника Terra расчеты NDSI проводятся по следующей формуле:

$$\text{NDSI} = \frac{\text{band3} - \text{band6}}{\text{band3} + \text{band6}}$$

где band 3 и 6 – значения интенсивности излучения в 3-м и 6-м каналах радиометра MODIS. Критериями для выделения снежного покрова [5] служат следующие интервалы индекса и величины интенсивности излучения в 3-м канале:

1. «снег», если  $\text{band3} \geq 0.1$  и  $\text{NDSI} \geq 0.4$ ;
2. «облачность», если  $\text{band3} \geq 0.1$  и  $-0.2 \leq \text{NDSI} < 0.4$  ;
3. «полупрозрачная облачность», если  $\text{band3} \geq 0.1$  и  $-0.2 > \text{NDSI} \geq -0.5$ ;
4. «чистая поверхность», во всех остальных случаях.

В мировой научной среде направление космического мониторинга схода снежного покрова достаточно развито. Например, Национальный центр ледников США (U.S. National Ice Center) ежедневно в оперативном режиме публикует данные космического мониторинга снежного покрова по всему земному шару, включая Евразию [6]. На рисунке 1 приведен пример результатов мониторинга снежного покрова на 28 февраля 2013 года.

Карты, выпускаемые Национальным центром ледников США в планетарном масштабе, имеют низкое пространственное разрешение порядка 20 км. Такая точность мониторинга, хотя и позволяет оценить межгодовые вариации, но не пригодны для оценки аномалий залегания относительно среднесуточных данных и оценки влияние глобального изменения климата на залегание снежного покрова.

В Казахстане по данному направлению не первый год ведутся работы и разработаны соответствующие методики [7-9], получены результаты космического мониторинга схода снежного покрова за последнее десятилетие [10].

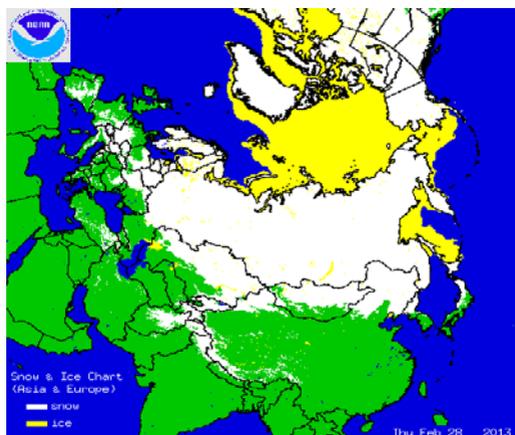


Рисунок 1 – Пример данных ежедневного мониторинга Евразии U.S. National Ice Center (США)

Логическим продолжением этих работ является изучение возможности космического мониторинга установления снежного покрова. В метеорологии существует два термина: «снежный покров» и «устойчивый снежный покров». Днём со снежным покровом считают такой, когда более половины видимой окрестности покрыто снегом (6 баллов). Устойчивым считается такой снежный покров, который лежал непрерывно в течение всей зимы или не менее месяца с перерывами не более 3 дней подряд. Данные космического мониторинга не позволяют корректно оценить балльность на конкретной точке. Также вследствие облачности затруднительно оценить перерывы в три дня. В результате возникает некоторое разночтение в терминах, так как по спутниковым данным оценивается лишь факт схода или установления на конкретном пикселе изображения.

В целом, методология построения карт установления снежного покрова схожа с методикой построения карт снеготаяния, так как по сути сход и установление снежного покрова - это зеркальные процессы. Как указывалось выше, граница снежного покрова определяется как путем применения «снежного индекса», так и методом экспертной оценки. Исходные спутниковые снимки NOAA представляют собой файлы-контейнеры в формате HDF, содержащие изображения в пяти каналах (видимом и инфракрасном диапазоне). Размер матрицы для территории Казахстана у всех снимков стандартный и равен 4301 на 1601 пикселей, проекция – долгота-широта. Под обзором установления снежного покрова, в основном, понимается граница залегания снежного покрова и граничные области. При этом особенно важно получить как можно более непрерывную границу снежного покрова, так как использование интерполяции и других способов в данном случае малооправданно.

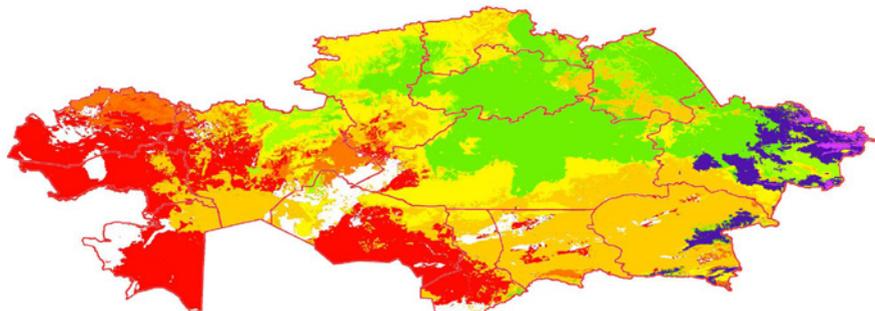
Период установления снежного покрова продолжается со второй декады октября на севере Казахстана и до конца второй декады декабря на юге. Для этого периода необходимо было подготовить ежедневные космические снимки. Применение так называемой «легко читаемой» шкалы с большим количеством градаций возможно только с применением палитры цветов. Так как для отображения цветного изображения на электронных устройствах применяется цветовая палитра на основе трех цветов: красного, зеленого, синего, то для идентификации ежедневных снимков была использована цветовая палитра RGB (red, green, blue – красный, зеленый, синий; аддитивная цветовая модель, описывающая способ синтеза цвета). Палитра была разбита на составляющие цвета так, чтобы каждому дню соответствовал строго определенный цвет в виде численных значений каждой составляющей палитры RGB [7].

Цвета в палитре подобраны эмпирическим путем с таким расчетом, чтобы достигнуть высокой цветовой контрастности между декадами и, вместе с тем, обеспечить плавный переход спектра с учетом динамики снеготаяния. Кроме того, интервалы между цветами позволяют сжимать изображения специальными алгоритмами без существенной потери информативности о дате.

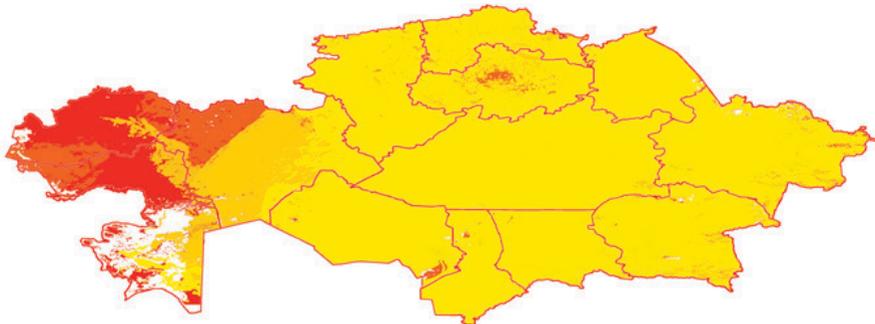
После определения цветовой шкалы на спутниковых снимках выделялась граница снежного покрова и отмечалась определенным для этого дня цветом.

Выделенные таким образом области, занятые снежным покровом, в любом

инструментальном пакете ГИС последовательно накладываются в виде слоев за весь период наблюдений и получают карты динамики установления снежного покрова рисунок 2 (а-д).

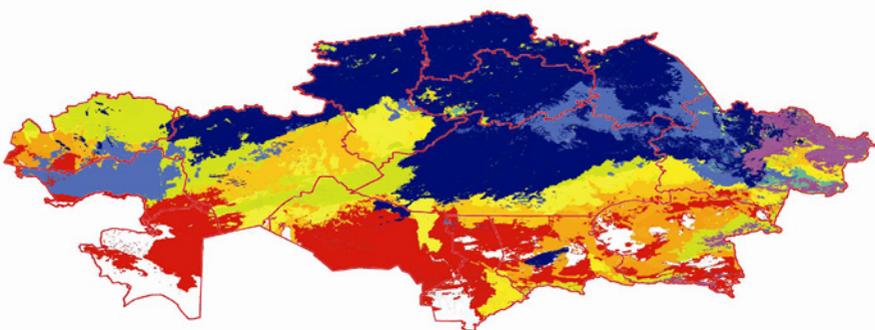


*a*



*б*

Рисунок 2 - Установление снежного покрова в 2005 (а), 2006 (б), 2007 (в), 2008 (г) и в 2011 (д) году





При этом оценить точную дату выпадения снежного покрова, а она может быть не одна, так как снегопад мог наблюдаться неоднократно в разные дни на разных территориях, без привлечения данных наземных наблюдений практически не возможно. Таким образом, один безоблачный снимок в неделю получить достаточно сложно, но и он не позволяет проследить динамику установления, так как снежный покров может значительно увеличить занимаемую площадь.

При анализе карт установления снежного покрова хорошо заметно, что обычно прослеживаемая на картах снеготаяния широтная зональность отсутствует. Часто наблюдаются снежные полосы, вытянутые с юго-запада на северо-восток. При этом часть выпавшего снега в южных частях почти сразу стает, поэтому оценить сроки достаточно сложно. Следует также оговорить, что ввиду значительной облачности построение карт динамики установления снежного покрова либо невозможно в отдельные годы, либо они строятся с минимальным временным разрешением. Особенно хорошо это заметно на примере 2006г. и 2008г. - рисунок 2 (б, г), когда снежный покров установился на всей территории Казахстана за 2-3 дня, хотя в реальных условиях это возможно могло занять несколько дней. Как правило (в период 2001-2004, 2009-2010 гг.) нет никакой возможности построить карту установления снежного покрова, так как большое количество облачности препятствует цельному обзору снежного покрова.

Таким образом, в течение последнего десятилетнего периода проследить динамику установления снежного покрова удалось лишь в половине исследуемого периода, при этом в двух годах из пяти карты динамики малоинформативные, а в остальных трех случаях - не корректные и подвержены влиянию отдельных кратковременных снегопадов.

Таким образом, наличие снежного покрова хорошо детектируется на спутниковых оптико-электронных снимках. Выделение снежного покрова и методика мониторинга снеготаяния хорошо изучены. Между тем, большой интерес представляет изучение сроков залегания снежного покрова. Эти данные можно получить, определив дату установления снежного покрова. Однако процесс мониторинга установления снежного покрова по оптико-электронным данным весьма затруднен, так как неразрывно связан с циклонической деятельностью и сплошной облачностью вплоть до полной невозможности построения карт установления снежного покрова - до 50 % случаев. В остальных случаях построенные карты динамики установления снежного нуждаются в уточнении. Для этого настоятельно рекомендуется использование данных о выпадении осадков с наземных метеорологических станций.

В целом, правомерно сделать заключение о том, что работа в данном направлении видится достаточно перспективной и актуальной, особенно в условиях глобального изменения климата. Прослеживание динамики установления снежного покрова по оптико-электронным данным, несмотря на все их достоинства, затруднено. При увеличении числа радиолокационных спутниковых систем перспективными для данной тематики будут данные радиолокационной съемки в С- и L-диапазоне и, возможно, данные микроволновых сенсоров в СВЧ-диапазоне.

## Список литературы

- [1] Снег. Справочник. // Под ред. Д.М.Грея и Д.Х.Мейла. Пер. с англ. - Л.: Гидрометеоздат, 1986. - 752с.
- [2] *Богородский В.В., Козлов А.И., Тучков Л.Т.* Радиотепловое излучение земных покровов. // Л.: Гидрометеоздат, 1977. – 224 с.
- [3] *Appel F., Bach H., Loew A., et al.* // Proc. 2005 IEEE Int. Symp. Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'05). Seoul. 25-29 Jul. 2005. N.Y.: IEEE, 2005. V. 3. P. 1955.
- [4] *Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V.* Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // Remote Sensing of Environment, 1995, №54, P.127-140.
- [5] *Нейштадт И.А.* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2006. Выпуск 3. Т. II. С.359-365.
- [6] [http://www.natice.noaa.gov/pub/ims/ims\\_gif/ARCHIVE/EuAsia/2012/](http://www.natice.noaa.gov/pub/ims/ims_gif/ARCHIVE/EuAsia/2012/)
- [7] *Кауазов А.М.* О применении инфракрасных каналов радиометра NOAA/AVHRR для определения даты начала снеготаяния // Гидрометеорология и экология. –2010. –№ 1. –С. 116-123.
- [8] *Кауазов А.М.* Возможность определения дат схода снежного покрова в Северном Казахстане по спутниковым данным NOAA/AVHRR // Вестник КазНУ. Серия географическая. –2010. –№1. –С. 95-99.
- [9] *Кауазов А.М.* Методика определения максимальных влагозапасов в Северном Казахстане с использованием данных дистанционного зондирования // Поиск. Серия естественных и технических наук. – 2010. – № 3(1). –С. 149-153.
- [10] *Кауазов А.М., Муратова Н.Р., Тюребаева С.И., Бердыгулов Н.* Мониторинг снеготаяния в Северном Казахстане с использованием спутниковых данных NOAA/AVHRR // Прикладные космические исследования в Казахстане. Под ред. Жантаева Ж.Ш., Алматы: Дайк-Пресс, 2010. –С. 25-29.

## 4.8 ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Бекмухамедов Б.Э., Гаврук С.В., Каипов И.В.  
ДТОО «Институт космических исследований имени академика  
У.М. Султангазина» АО «НЦКИТ»

АО «Национальный центр космических исследований и технологий»

Для своевременных и успешных действий, направленных на ликвидацию природных пожаров, необходимо внедрение в оперативную практику численных моделей, которые должны стать неотъемлемой частью систем принятия решений по предотвращению чрезвычайных ситуаций (ЧС). В настоящее время разработано более пятидесяти моделей лесных и степных пожаров, однако только четыре из них реализованы в виде программных комплексов и активно применяются специалистами. Это эмпирические модели FCFDG (Forestry Canada Fire Danger Group, Канада) [1], А. Макартура (McArthur, Австралия) [2], В. Харгроув (W. Hargrove, США) [3] и полуэмпирическая модель Р. Ротермела (R. Rothermel, США) [4].

На практике наибольшее применение получила модель Р. Ротермела, реализованная в виде программного комплекса FARSITE /Fire Area Simulator [5]. Причиной широкого распространения этой модели стала ее доступность, простота применения и наличие хорошей документации. Результатом моделирования являются данные о прогнозируемом ареале и скорости распространения пожара в зависимости от характеристик растительного покрова, топографии местности и скорости ветра. Эта модель была разработана на теоретической базе, в основе которой лежит закон сохранения энергии на единицу объема топлива в однородном слое [6]. Квазистационарная скорость распространения пожара  $R$  определяется из соотношения:

$$R = \frac{I_{xig} + \int_{-\infty}^0 \left(\frac{\partial I_z}{\partial z}\right)_{z_c} x dz}{\rho_{be} Q_g} \quad (1),$$

где  $I_{xig}$  – горизонтальный поток тепла, поглощенный единицей объема топлива в момент воспламенения;  $\rho_{be}$  – эффективная объемная плотность;  $Q_g$  – количество тепла, необходимое для воспламенения (тепло, необходимое, чтобы привести

к воспламенению единицу массы топлива);  $\left(\frac{\partial I_z}{\partial z}\right)_{z_c}$  – вертикальный градиент

потока тепла с горизонтальной плоскости с постоянной глубиной  $Z_c$  слоя топлива;  $x$  и  $z$  - горизонтальные и вертикальные координаты, соответственно. Уравнение (1) показывает, что скорость распространения пожара зависит от соотношения между потоком тепла, получаемым от источника тепла (в числителе) и теплом, необходимым для воспламенения потенциального топлива (в знаменателе). В аналитическом виде уравнение (1) не может быть решено, поскольку к настоящему времени еще плохо изучены механизмы передачи тепла. Для решения уравнения (1) необходимо исследовать каждую переменную и определить их эмпирическими или аналитическими методами.

Количество тепла, необходимое для воспламенения, зависит от температуры воспламенения, содержания влаги в топливе и количества топлива, участвующего в процессе воспламенения. Энергия, необходимая для воспламенения единицы массы топлива,  $Q_{ig}$ , определяется как:

$$Q_{ig} = f(M_f, T_g) \quad (2),$$

где  $M_f$  - отношение содержания влаги в топливе к его сухому весу;  $T_g$  - температура воспламенения.

Количество топлива, вовлекаемого в процесс горения, называют эффективной объемной плотностью, а эффективный коэффициент горения определяется как отношение эффективной плотности к плотности топлива:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{be}}{\rho_b} \quad (3)$$

Эффективный коэффициент горения близок к единице для мелких частиц топлива и стремится к нулю при увеличении их размера. Таким образом, эффективная плотность горения является функцией плотности и размеров частиц топлива.

Как следует из уравнения (1), поток тепла на единицу площади за единицу времени определяется соотношением:

$$I_p = I_{xig} + \int_{-\infty}^0 \left( \frac{\partial I_z}{\partial z} \right)_{z_c} x d \quad (5)$$

Тепловые потоки для различных случаев схематично представлены на рисунках 1, 2 и 3. Видно, что вертикальный поток играет более значительную роль во время пожара с ветром и пожара, распространяющегося вверх по склону, поскольку пламя наклоняется над потенциальным топливом, тем самым, увеличивая тепловое излучение. Ясно, что наиболее существенное влияние на распространение пламени оказывает прямой контакт пламени с горючим материалом и конвективный теплообмен.

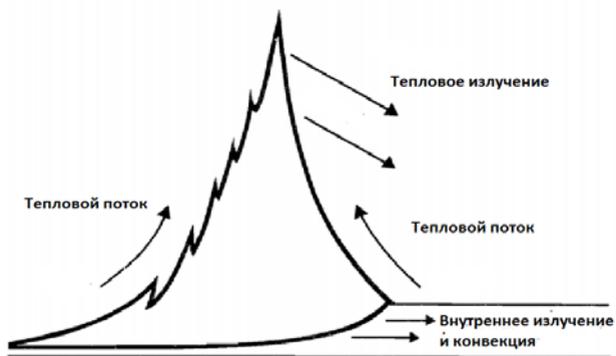


Рисунок 1 - Схема распространения пламени в отсутствии ветра



Рисунок 2 - Схема распространения пламени при наличии ветра

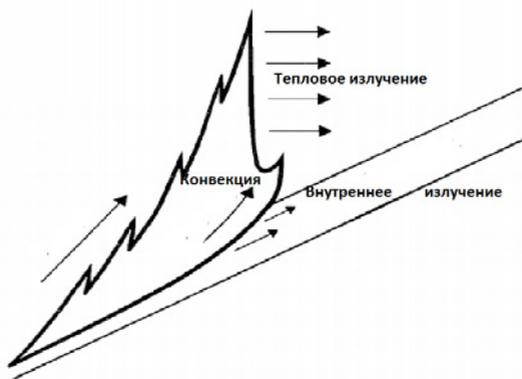


Рисунок 3 - Схема распространения пламени вверх по склону

Будем считать, вертикальный поток мал для безветренных пожаров и пусть  $I_p = (I_p)_o$ . Подставляя соотношения (3) и (5) в уравнение (1), и допуская  $I_p = (I_p)_o$  и  $R = R_0$ , для безветренных пожаров получим:

$$(I_p)_o = R_o \rho_b \varepsilon Q_g \quad (6)$$

Составляющие уравнения (6) могут быть оценены экспериментально с помощью наблюдений за распространением пожаров в безветренных условиях, путем измерения  $R_0$  для различных видов топлива.

Скорость высвобождения энергии на фронте огня зависит от сжигания газов, выделяющихся из органических веществ в топливе. Таким образом, скорость выделения горючих газов топливом влияет на скорость тепловыделения. Скорость выделения тепла на единицу площади на фронте пожара называется интенсивностью реакции и определяется как:

$$I_R = -\frac{wd}{td} h \quad (7)$$

где  $\frac{wd}{td}$  – потеря массы в расчете на единицу площади на фронте пожара;  
 $h$  –теплосодержание топлива.

Интенсивность реакции является функцией таких параметров топлива, как размер частиц топлива, насыпная плотность, влажность и химический состав.

Модель основывается на эмпирической корреляционной связи между  $(I_p)_o$  и  $I_R$ . Зная эту корреляцию, величина  $(I_p)_o$  может быть определена из  $I_R$ , которая, в свою очередь, зависит от параметров топлива. Ветер и наклон изменяют интенсивность распространения тепла путем воздействия на потенциальное топливо дополнительными конвективными и лучистыми потоками тепла (рисунки

2 и 3). Пусть  $\varphi_w$  и  $\varphi_s$  представляют собой дополнительные параметры, влияющие на интенсивность распространения тепла, создаваемого ветром и наклоном. Это безразмерные коэффициенты, зависящие от ветра, наклона и параметров топлива. Они могут быть оценены с помощью экспериментальных данных. Например,

множитель «учета ветра»  $\varphi_w$  получен эмпирически в лабораторных условиях путем наблюдения за горением опилок, а также основываясь на результатах работы [2], по сжиганию травяного покрова в реальных условиях. С учетом

безразмерных коэффициентов  $\varphi_w$  и  $\varphi_s$  уравнение (1) приобретает вид:

$$R = \frac{(I_p)_o (1 + \varphi_w + \varphi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_g} \quad (8)$$

Основываясь на полуэмпирической теории, базовые положения которой изложены выше, был создан программный комплекс FARSITE /Fire Area Simulator для расчета скорости и ареалов распространения природных пожаров.

Входные данные для программы FARSITE содержатся в следующих файлах:

- Файл ландшафта (landscape);
- Модель топлива (fuel model);
- Плотность покрова (canopy cover);
- Файл поправочных коэффициентов (Adjustment Factor);
- Начальная влажность топлива (FMS).
- Файл погоды (. WTR).
- Файл ветра (. WND).

Файл ландшафта генерируется программой по данным, экспортируемым из цифровой модели рельефа в формате ASCII GRID. К ним относятся высота над уровнем моря (elevation) и наклон местности (slope). Файл в формате ASCII GRID представляет собой обычный текстовый файл, в котором содержимое разделяется на две части: 1) заголовок, где записывается общая информация о размере, географической привязке и т.д.; 2) непосредственно данные. В настоящее время этот формат поддерживается многими ГИС и, в том числе, большинством открытых и свободно распространяемых (GRASS, QGIS, SAGA и т.д.).

В файле fuel\_model (модель топлива) указывается индекс модели топлива. За основу принята классификация стандартных моделей топлива, разработанная Андерсоном (Anderson) [6], (см. таблицу 1). Индексы моделей 1-13 зарезервированы для стандартной модели топлива, индексы 101-219 используются для расширения набора стандартных моделей. Зарезервирован диапазон индексов для нестандартных пользовательских моделей. Выделены следующие типы горючих материалов:

- (NB) - негорючие;
- (GR) - травянистые;
- (GS) - травянисто-кустарниковые;
- (SH) - кустарниковые;
- (TU) - подлески;
- (TL) - леса;
- (SB) - вырубки.

Таблица 1 - Значения индексов стандартных и нестандартных моделей топлива

Тип топлива	Индексы моделей	Индексы стандартных моделей	Индексы, зарезервированные для расширения стандартных моделей	Индексы для нестандартных пользовательских моделей
	1-13	1-13		
	14-89			14-89
NB	90-99	91-93, 98-99	94-95	90, 96-97
GR	100-119	101-109	110-112	100, 113-119
GS	120-139	121-124	125-130	120, 131-139
SH	140-159	141-149	150-152	140, 153-159
TU	160-179	161-165	166-170	160, 171-179
TL	180-199	181-189	190-192	180, 193-199
SB	200-219	201-204	205-210	200, 211-219
	220-256			220-256

Плотность растительного покрова необходима для расчета параметра шероховатости подстилающей поверхности, влияющей на вертикальный профиль скорости ветра. Плотность растительного покрова – это относительная плотность крон растений, которая определяется как их вертикальная проекция на земную поверхность. Единицами измерения могут быть категории (1-4) или процентные значения (0-100). Имеются следующие категории:

- 1) 1-20%; 2) 21-50%; 3) 50-80%; 4) 81-100%.

Файл поправочных коэффициентов (ADJ) используется пользователями программы для корректировки скорости распространения пожара, основываясь на предыдущем опыте и данных наблюдений за фактической скоростью распространения огня. Поправочные коэффициенты модели топлива умножаются на скорость распространения огня для достижения указанной корректировки. При моделировании на больших пространственных и временных отрезках фактическая скорость распространения может быть больше или меньше, чем предсказывает модель, из-за использования данных грубого пространственного и временного разрешения, не учитывающих более мелкие масштабы неоднородностей. Изменение скорости распространения может быть вызвано также из-за ошибок в модели топлива, неточных данных о влажности топлива или неправильного представления о местных ветрах, их изменчивости в пространстве и времени.

Файл погоды содержит среднесуточные значения максимальной и минимальной температуры, относительной влажности приземного воздуха, облачности и количество осадков выпавших за сутки.

Файл ветра содержит информацию о скорости и направлении ветра, который может задаваться постоянной величиной или меняться в течение определенного промежутка времени.

Процесс моделирования распространения пожара для определенной местности начинается с формирования файла ландшафта на основе цифровой модели района. В зависимости от местности указывается модель топлива и плотность растительного покрова. Далее создается файл проекта, в который добавляются файл ландшафта, файл поправочных коэффициентов, файл начальной влажности, файл погоды и файл ветра. На рисунке 4 представлен графический интерфейс программного комплекса FARSITE (Fire Area Simulator).

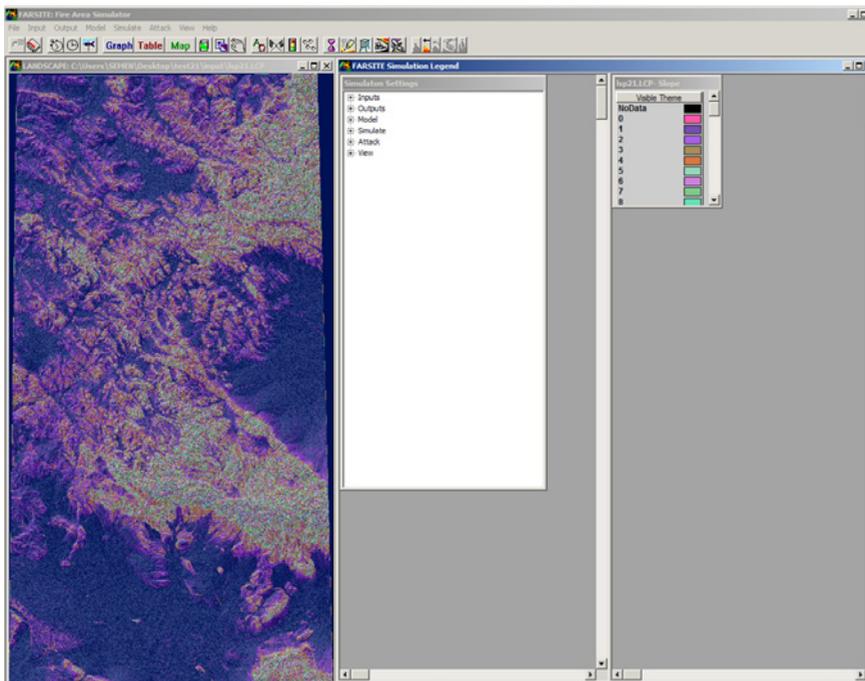


Рисунок 4 - Графический интерфейс программного комплекса FARSITE (Fire Area Simulator)

В ДТОО «Институт космических исследований имени академика У.М. Султангазина» АО «НЦКИТ» уже более 10 лет проводится космический мониторинг ЧС на территории Казахстана с использованием данных сенсоров MODIS, расположенных на спутниках TERRA и AQUA. Оперативный космический мониторинг пожаров на всей территории Казахстана осуществляется с середины марта по ноябрь месяц. В процессе оперативного космического мониторинга пожаров формируются геопривязанные карты очагов пожаров на основе ночных и дневных снимков, а также карты выгоревших и пострадавших от пожаров площадей.

Для моделирования был выбран пожар на территории Восточно-Казахстанской области, продолжавшийся с 21 по 23 августа 2012 года. Карты очагов пожаров, полученные с помощью данных дистанционного зондирования (ДЗ), представлены на рисунках 5 и 6.

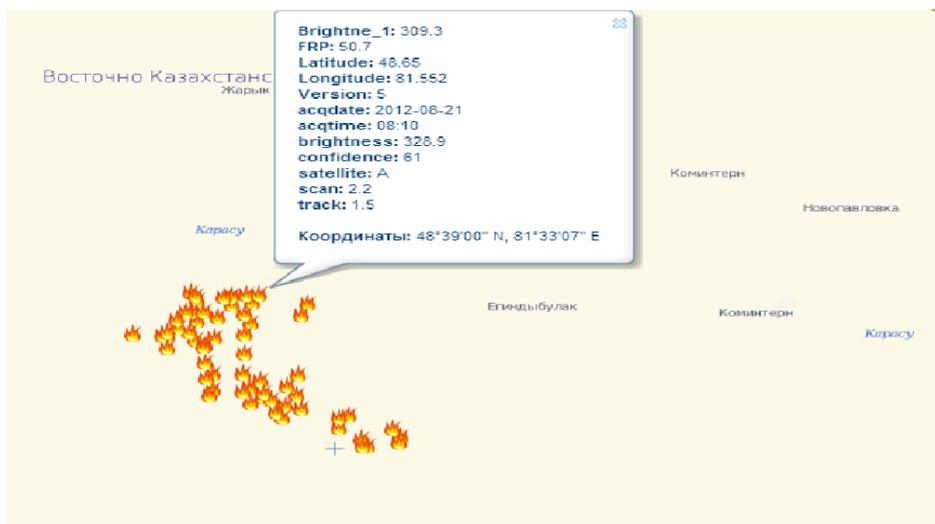


Рисунок 5 - Очаги пожаров 21 августа 2012 года, зафиксированные с помощью ДЗ

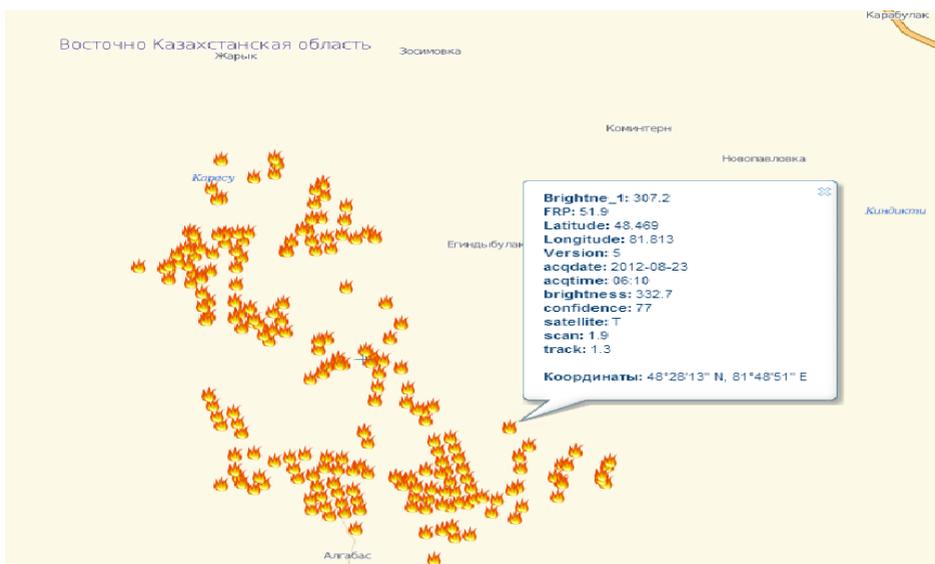


Рисунок 6 - Очаги пожаров 23 августа 2012 года, зафиксированные с помощью ДЗ

На рисунке 7 показан контур выгоревшей при пожаре территории.

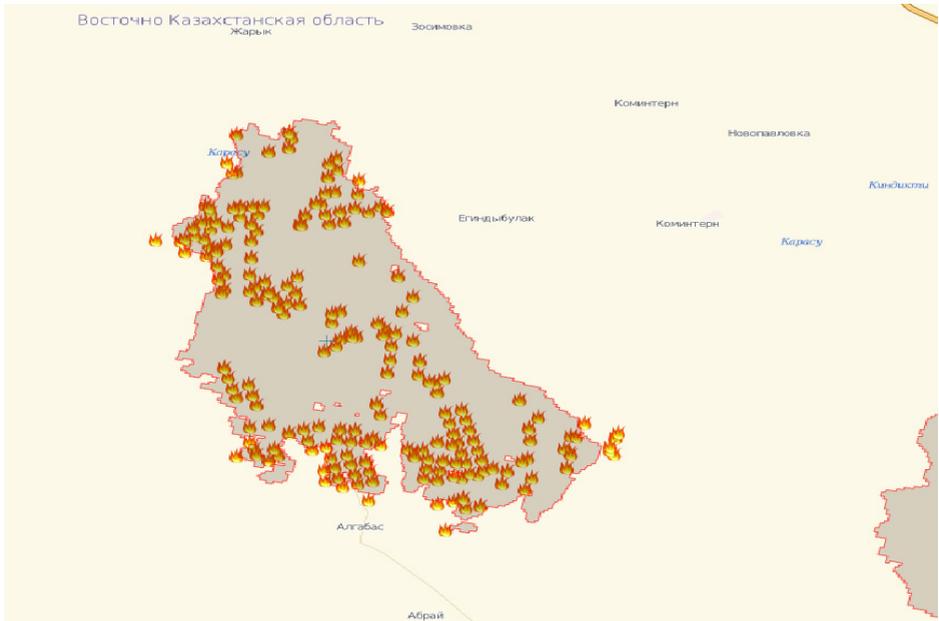


Рисунок 7 - Контур выгоревшей территории при пожаре 21-23 августа 2012 г.

На этапе подготовки к численному эксперименту из данных цифровой модели рельефа для данной местности был получен файл в формате ASCII GRID с разрешением в 90 метров и на его основе создан файл ландшафта. В качестве модели топлива выбрана модель 3 из классификации горючих материалов по Андерсону. Значения скорости и направления ветра были взяты из данных ближайшего к месту пожара узла сетки ( $48^{\circ}25'$  С.Ш.  $81^{\circ}25'$  В.Д.) глобальной системы прогнозирования погоды GFS (рисунок 8).

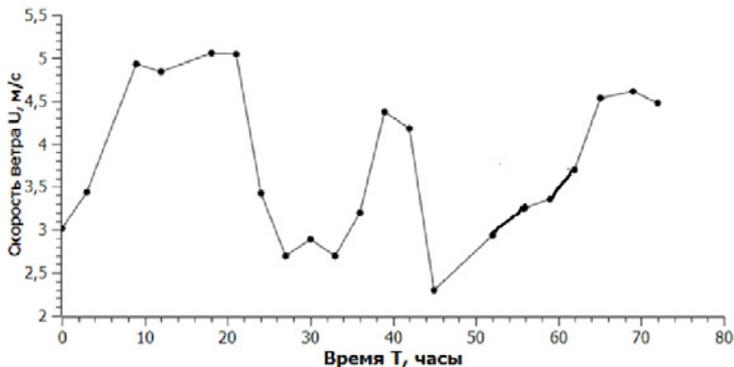


Рисунок 8 - Скорость ветра за период с 21 по 23 августа 2012 года для точки с координатами  $48^{\circ}25'$  С.Ш.  $81^{\circ}25'$  В.Д.

Погодные условия в период с 21 по 23 августа 2012 года были достаточно однородны, без осадков и облачности, с колебанием температуры от 10-ти до 30 градусов по Цельсию, и колебанием влажности от 30-ти до 90% ежедневно. На основе этих данных был сформирован файл погоды.

Моделирование развития пожара проводилось с 6 часов 08.21.2012 до 18 часов 08.23.2012. На рисунке 9 изолиниями представлен рассчитанный ареал распространения пожара. Для сравнения в качестве подложки приведена фактически выгоревшая площадь. Очевидно, что результаты моделирования существенно отличаются от фактически выгоревших территорий. В частности, модель предсказывает распространение огня в западном направлении, однако в реальности этого не наблюдалось.



Рисунок 9 - Рассчитанный и фактический ареал распространения пожара (рассчитанный - изолинии, фактический - серый контур)

Для более точных расчетов в модель, в качестве непреодолимой преграды для огня, была введена дорога, проходящая в исследуемом районе. Результаты моделирования с учетом дороги представлены на рисунке 10. Видно, что более реалистичные данные получены при принятии в расчет дороги.



Рисунок 10 - Рассчитанный и фактический ареал распространения пожара с учетом дороги (рассчитанный - изолинии, фактический - серый контур, дорога - жирная линия)

Выполненные исследования указывают на то, что моделирование пожаров это сложная задача, требующая учета множества факторов, таких, как рельеф местности, состояние подстилающей поверхности, растительного покрова, климатических и погодных условий, водных и иных преград. Совершенствование методов моделирования пожаров и их сочетание с мониторингом на основе спутниковой информации позволит существенно ускорить решение задачи прогнозирования природных пожаров.

### **Список литературы**

- [1] FCFDG (Forestry Canada Fire Danger Group). 1992. Development and structure of the Canadian forest fire behaviour prediction system. Forestry Canada and Science and Sustainable Development Directorate, Ottawa, ON. Information Report ST-X-3; 63 p
- [2] *McArthur A. G.* Weather and grassland fire behaviour. Commonwealth of Australia: Forestry Research Institute, Leaflet. No. 100. 1966. 23 p.
- [3] *Hargrove, W.W., R.H. Gardner, M.G. Turner, W.H. Romme, and D.G. Despain.* 2000. Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. *Ecological Modelling* 135(2-3):243-263
- [4] *Rothermel R.C.* A Mathematical model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels. USDA Forest Service. Res. Pap. INT-115, 1972. 43 p.
- [5] *Sandenberg D. V et al.* Reformulation of Rothermel's wildland fire behavior model for heterogeneous fuelbeds // *Can. J. For. Res.* 2007. № 37. P. 2438–2455.
- [6] *Frandsen, W. H.* 1971. Fire spread through porous fuels from the conservation of energy. *Combust. and Flame* 16:9-16, illus.

## 4.9 ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КА

*Елубаев С.А., Джамалов Н.К., Алипбаев К.А., Сухенко А.С., Бонеев Т.М.*

ДТОО «Институт космической техники и технологий» АО «НЦКИТ»

При движении космического аппарата по орбите на него действуют возмущающие факторы космической среды, такие, как несферичность Земли, гравитационное притяжение Луны, Солнца и планет, аэродинамическое сопротивление атмосферы Земли, магнитное поле Земли, силы давления солнечного света. Учет всех этих факторов при изучении движения космического аппарата является довольно сложной задачей. Кроме того возникают задачи формирования управляющих воздействий с целью компенсации этих возмущений, изменения параметров орбиты или пространственной ориентации космического аппарата. Для нормального функционирования космического аппарата также необходимо изучать вопросы энергоснабжения, связи с наземным комплексом управления и целый ряд других задач. Создание компьютерных моделей значительно облегчает эти задачи. В работе рассматривается имитационная модель основных служебных подсистем космического аппарата, разработанная в среде MathWorks MatLab/Simulink, которая на сегодняшний день является самым эффективным средством компьютерного моделирования сложных технических систем [1].

Разработанная имитационная модель представлена на рисунке 1 и состоит следующих модулей: «Environment», «TotalForceAndMoment», «Satellite», «GroundControlStation», «ReportingBlock», «VisualizationBlock».

Модуль «Environment» представляет собой имитационную модель космической среды, представленной Землей, Луной и Солнцем. Входными параметрами модуля являются параметры космического аппарата (параметры орбиты, вектор положения и вектор скорости движения центра масс, угловое положение и угловая скорость движения относительно центра масс, массогабаритные и геометрические параметры космического аппарата). Выходными параметрами являются векторы сил и моментов сил от возмущающих воздействий космической среды и параметры космической среды. Внутренняя структура модуля показана на рисунке 2 и состоит из блоков «Earth», «Moon» и «Sun». Блок «Earth» представляет собой модель Земли (рисунок 3) и состоит из подблоков «GravitationalField», «AtmosphereField», «MagneticField» и «Perturbation».

Подблоки «GravitationalField», «AtmosphereField» и «MagneticField» представляют собой соответственно модели гравитационного поля, атмосферы и магнитного поля Земли [2,3] и содержат внутреннюю структуру, построенную в соответствии с международными стандартами EGM2000, CIRA-96 и IGRF2010. Блок «Moon» представляет собой имитационную модель Луны, а блок «Sun» -имитационную модель Солнца, которые производят расчёт гравитационного влияния Луны, Солнца и влияния сил давления солнечного света [2] на движение космического аппарата. В подблоке «Perturbation» формируется общее влияние



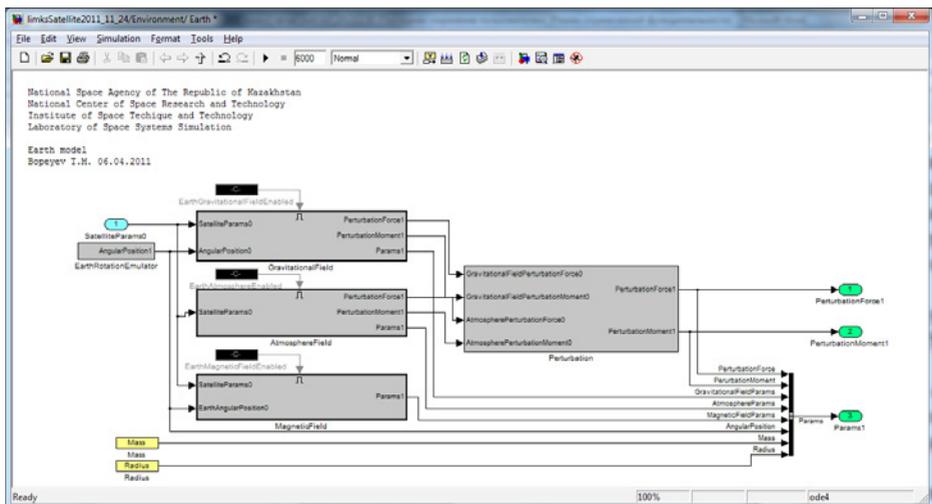


Рисунок 3 - Имитационная модель Земли

Модуль «Satellite» представляет собой имитационную модель космического аппарата. Входными параметрами модуля являются возмущающие и управляющие силы и моменты, параметры космической среды и параметры наземного комплекса управления. Выходными параметрами являются параметры космического аппарата, параметры движения (вектор положения, вектор скорости), параметры ориентации (угловое положение и угловая скорость), масса, геометрические параметры, параметры системы ориентации, параметры системы связи, параметры системы энергоснабжения) и управляющие воздействия, сформированные системой управления. В этом модуле для каждого изучаемого космического аппарата необходимо отдельно задавать массогабаритные и геометрические параметры космического аппарата. Внутренняя структура модуля «Satellite» представлена на рисунке 4 и содержит блоки «Motion», «OrientationSystem», «OnBoardSystem Emulator», «CommunicationsSystem», «PowerSystem».

Блок «Motion» моделирует движение как центра масс космического аппарата, так и движение космического аппарата относительно центра масс с учетом возмущающих и управляющих сил [3-10]. Блок «Motion» состоит из двух подблоков «SatelliteMotionEmulator» и «SatelliteRotationEmulator» (рисунок 5), которые одержат внутреннюю структуру, выполненную в соответствии с общими законами движения центра масс и относительно центра масс космического аппарата соответственно под воздействием внешних возмущающих и управляющих сил и моментов.

Блок «OrientationSystem» представляет собой модель системы ориентации космического аппарата. Внутренняя структура блока приведена на рисунке 6 и представлена моделями солнечного датчика «SunSensor», датчика горизонта Земли «EarthHorizonSensor», магнитного датчика «MagneticSensor», механического гироскопического датчика «Gyroscope» [11], оптического гироскопического датчика

«OpticalGyroscope», электромагнитного исполнительного органа «Magnetorquer» и инерционных исполнительных органов-маховиков «ReactionWheel». Таким образом, блок представляет собой набор моделей датчиков ориентации и исполнительных органов системы ориентации. Та или иная модель датчиков или исполнительных органов по желанию пользователя может быть включена или исключена из модели системы ориентации. Выходные параметры моделей датчиков ориентации подаются на вход модели бортового комплекса управления, где моделируются управляющие воздействия в соответствии с заданными законами управления и подаются на входы моделей исполнительных органов.

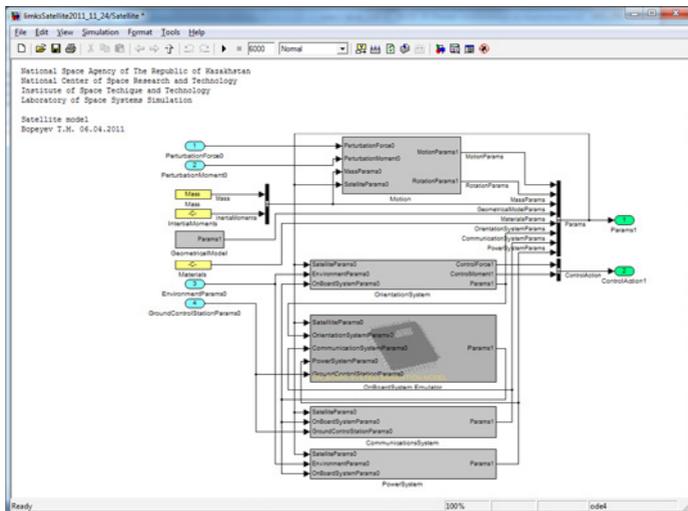


Рисунок 4 - Имитационная модель космического аппарата

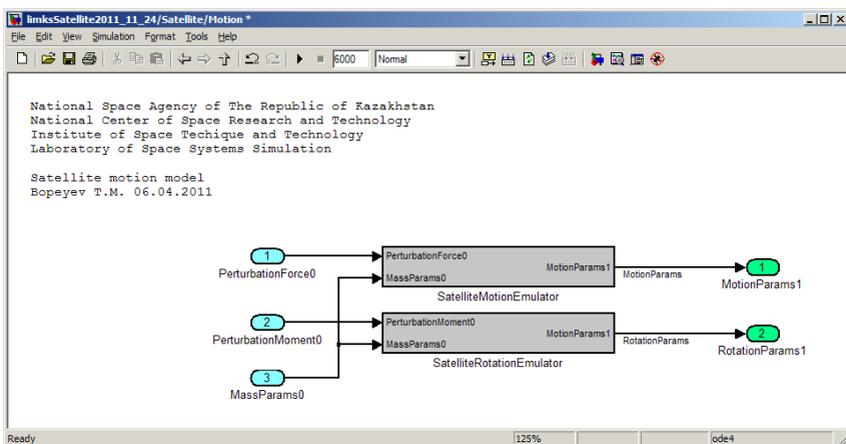


Рисунок 5 – Имитационная модель движения космического аппарата

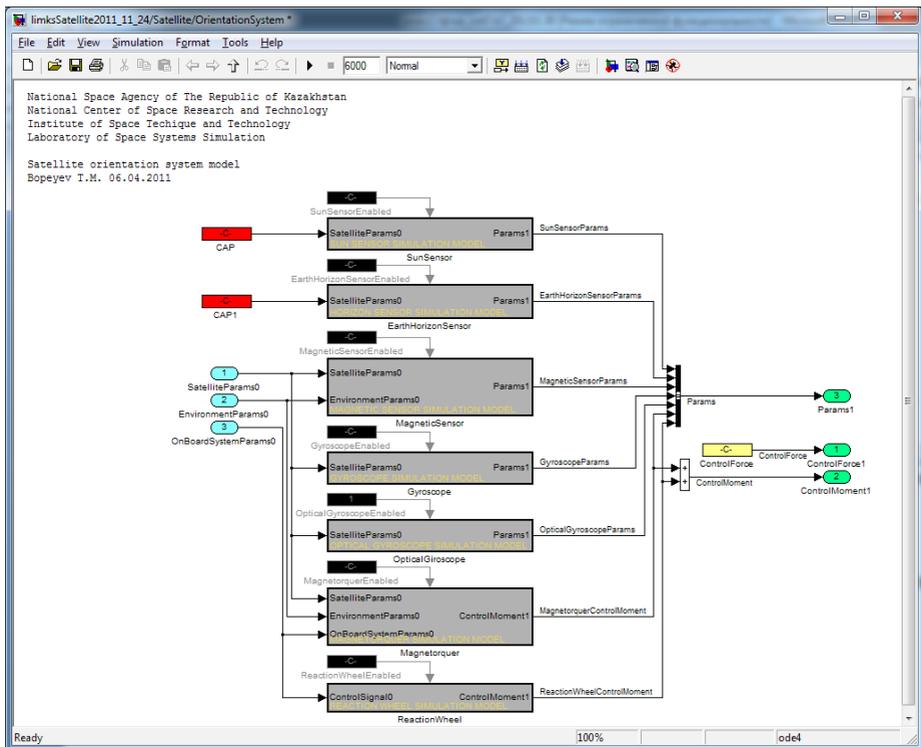


Рисунок 6 - Имитационная модель системы ориентации космического аппарата

Блоки «OnBoardSystem Emulator» моделирует работу бортового комплекса управления (рисунок 7). На вход блока подается информация от всех остальных блоков космического аппарата. Блок состоит из подблоков «OrientationSystemControlBlock», «CommunicationSystemControlBlock» и «PowerSystemControlBlock», которые формируют управляющие команды для модели системы ориентации, системы связи и системы энергоснабжения соответственно, таким образом, блок является замкнутой системой.

Блок «CommunicationsSystem» моделирует работу системы связи с наземным комплексом управления. Блок содержит внутреннюю структуру, которая моделирует работу приемно-передающих устройств и содержит подблок «Antenna», моделирующий работу приемопередающих антенн, и «SignalLevel», моделирующий уровень передаваемого сигнала в зависимости от выбранной частоты (рисунок 8).

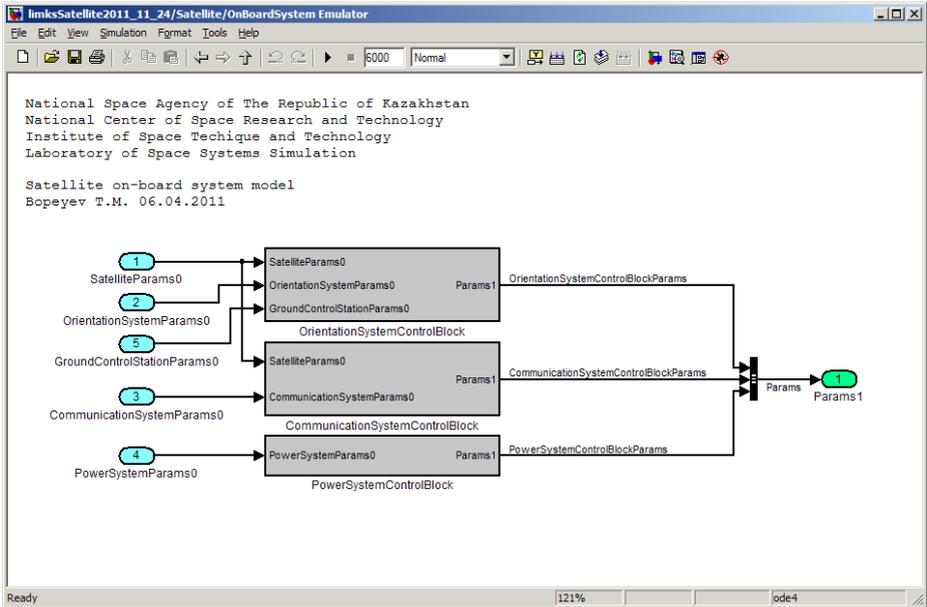


Рисунок 7 - Имитационная модель бортового комплекса управления

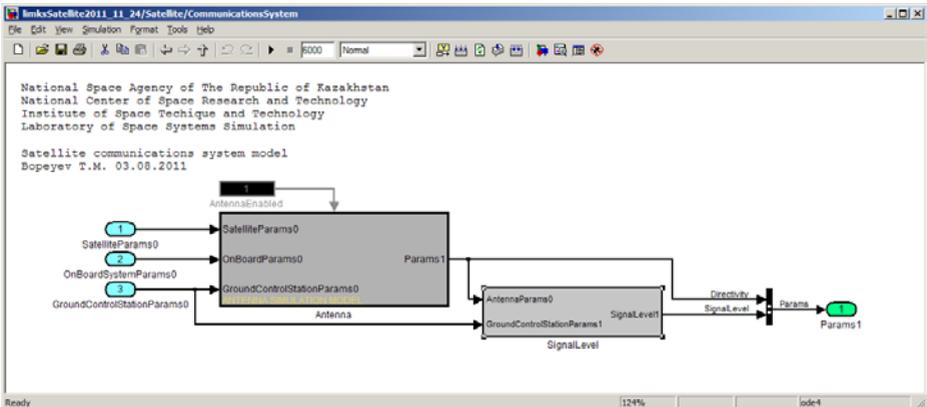


Рисунок 8 - Имитационная модель системы связи с наземным комплексом управления

Блок «PowerSystem» представляют собой имитационную модель системы энергоснабжения космического аппарата (рисунок 9) и состоит из основных подблоков «SolarArray», «AccumulatorBattery», «SolarArrayOrientationSystem», «PowerConditionAndDistributionUnit», «ProtectionControlBlock».

В подблоке «SolarArray» производятся расчеты мощности электроэнергии, генерируемой солнечными батареями при их параллельном подключении;

В подблоке «AccumulatorBattery» производится расчет уровня заряда

аккумуляторной батареи, ее напряжения, токов заряда и разряда, состояния и температуры;

В подблоке «SolarArrayOrientationSystem» производятся расчёты по определению требуемого угла поворота солнечных батарей;

В подблоке «PowerConditionAndDistributionUnit» производятся расчеты по управлению уровнем заряда аккумуляторной батареи и распределению питания между аккумуляторной батареей, шунтирующим регулятором и полезной нагрузкой. Также здесь осуществляется передача в бортовой комплекс управления телеметрической информации о состоянии аккумуляторной батареи и прием/исполнение команд управления зарядом аккумуляторной батареей;

В подблоке «ProtectionControlBlock» производятся расчеты по определению основных параметров аккумуляторной батареи и передача их в бортовой комплекс управления.

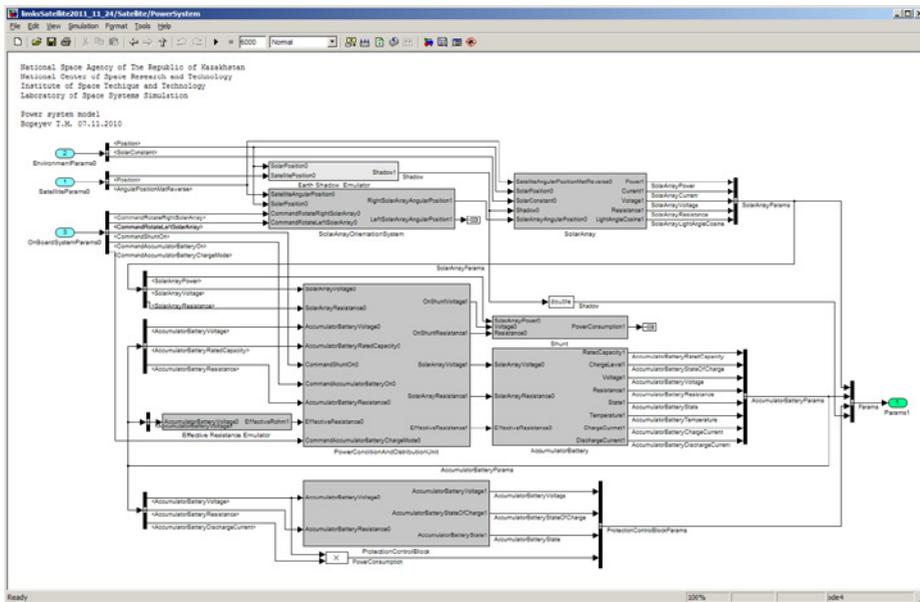


Рисунок 9 - Имитационная модель системы энергоснабжения космического аппарата

Модуль «GroundControlStation» представляет собой имитационную модель наземного комплекса управления (рисунок 10) и состоит из подблока, моделирующего работу центра управления «ControlCenter» и работу наземной передающей станции «GroundStation».

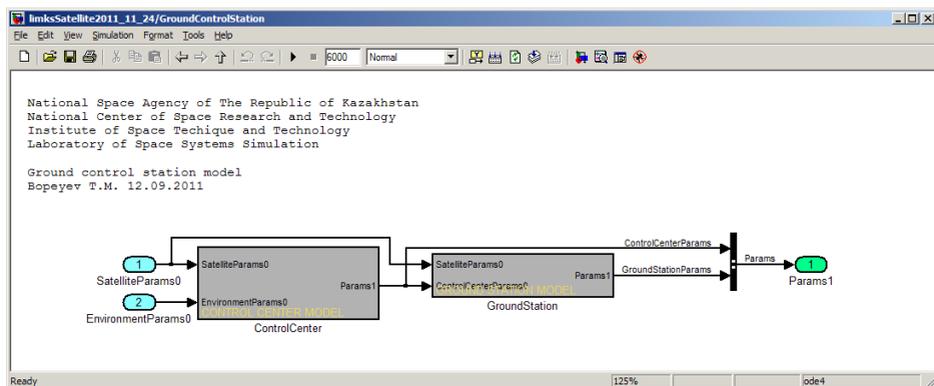


Рисунок 10 - Имитационная модель наземного комплекса управления

Кроме того модель содержит дополнительные модули. Модуль «ReportingBlock» служит для экспорта результатов имитационного моделирования движения космического аппарата в различные форматы данных для их последующей обработки и анализа. Модуль «VisualizationBlock» предназначен для графического представления результатов имитационного моделирования движения космического аппарата.

Разработанная имитационная модель основных служебных подсистем космического аппарата может быть использована для изучения движения космического аппарата под действием возмущающих факторов космической среды и управляющих воздействий со стороны системы управления космического аппарата, работы каждой подсистемы в отдельности, взаимодействия отдельных подсистем, а также работы космического аппарата в целом.

### Список литературы

- [1] Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. – М.: ДМК\_Пресс, 2008. – 784 с.
- [2] Тулешов А.К., Алипбаев К.А., Бопеев Т.М., Сухенко А.С. Расчет главного вектора и момента сил давления света при моделировании движения космического аппарата относительно центра// Вестник Национальной инженерной академии РК. -Алматы, 2009, №4(34). - С.61-65.
- [3] Молдабеков М.М., Джамалов Н.К., Алипбаев К.А., Бопеев Т.М., Елубаев С.А., Сухенко А.С. Моделирование движения центра масс космического аппарата с использованием среды Matlab-Simulink// Прикладные космические исследования в Казахстанею Серия «Казахстанские космические исследования». – Алматы, 2010, Том 6. -С.150-154.
- [4] Алипбаев К.А., Ахмедов Д.Ш., Бопеев Т.М., Джамалов Н.К., Елубаев С.А., Сухенко А.С., Тен В.В. Тестирование программного модуля расчёта траектории движения центра масс космического аппарата// Труды Международной научно - практической конференции посвящённой 75 - летию заслуженного деятеля науки

и техники Казахстана академика НАН РК профессора *Айталиева Ш.М.* «Механика и строительство транспортных сооружений». -Алматы, 2010, С. 340 - 343;

[5] *Alipbayev K., Rakisheva Z., Sukhenko A., Ahmedov D.* An analysis of perturbing factors in the spacecraft motion simulation model// Materials of international unmanned vehicles workshop. Turkish Air Force Academy, Aeronautics and Space Technologies Institute. -Turkey, Istanbul, 2010. P.74 - 78;

[6] *Молдабеков М.М., Джамалов Н.К., Елубаев С.А., Сухенко А.С.* Моделирование движения космического аппарата относительно центра масс в среде Matlab/Simulink// Материалы третьих Фесенковских чтений «Современная астрофизика: традиции и перспективы». -Алматы, 4-5 октября 2010 С. 81-83;

[7] *Елубаев С.А., Джамалов Н.К., Алипбаев К.А., Сухенко А.С., Бонеев Т.М.* Имитационная модель движения космического аппарата относительно центра масс в рамках изучения курса небесная механика// Материалы Международного научно - образовательного конгресса «Наука будущего». Алматы, 2010. С. 300 - 304.

[8] *Елубаев С.А., Джамалов Н.К., Алипбаев К.А., Бонеев Т.М., Сухенко А.С.* Имитационное моделирование движения космического аппарата// XIII Международная молодёжная научно – практическая конференция «Человек и Космос». – Днепропетровск, НЦАОМ, 2011. С. 320.

[9] *Елубаев С.А., Джамалов Н.К., Алипбаев К.А., Бонеев Т.М., Сухенко А.С.* Прогнозирование движения космического аппарата на основе имитационного моделирования// Третья Международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее» (Передовые космические технологии на благо человечества). -Днепропетровск, 2011. С. 25-26.

[10] *Елубаев С.А., Джамалов Н.К., Алипбаев К.А., Бонеев Т.М., Сухенко А.С.* Модель датчика горизонта земли// Материалы международной конференции «Космос на благо человечества – взгляд в будущее». –Астана, 2011. С. 132 – 134.

[11] *Елубаев С.А., Джамалов Н.К., Алипбаев К.А., Бонеев Т.М., Сухенко А.С.* Моделирование гироскопических датчиков// Тезисы докладов первого международного Джолдасбековского симпозиума. – Алматы, 2011. С. 59 – 60

## 4.10 НАУЧНЫЙ БЛОК КАЗАХСТАНСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Молдабеков М.М.<sup>1</sup>, Инчин А.С.<sup>2</sup>, Лозбин А.Ю.<sup>2</sup>, Шпади Ю.Р.<sup>2</sup>,  
Майлибаева Л.И.<sup>2</sup>, Шпади М.Ю.<sup>2</sup>, Инчин П.А.<sup>2</sup>, Аязбаев Г.М.<sup>2</sup>, Быкаев Р.Ж.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальное космическое агентство РК

<sup>2</sup>ДТОО «Институт космической техники и технологий» АО «НЦКИТ»

### 4.10.1 Введение

Продвижению инноваций и технологической модернизации в космической сфере Республики Казахстан будет способствовать, в частности, развитие научной и технологической базы по созданию отечественных образцов научного оборудования космических аппаратов научного, научно-технологического и образовательного назначения.

Космическая система научно-технологического назначения (КС НТН), состоит из научно-технологического космического аппарата (НТКА) и наземного комплекса управления спутником. В настоящей статье рассматривается проект создания и использования научного блока НТКА с аппаратурой для измерения параметров ионосферы.

#### **Цель проекта:**

Создание научного модуля космической системы научно-технологического назначения (КС НТН), для отработки технологий проектирования, сборки и испытаний спутниковой научной аппаратуры и проведения научных исследований ионосферы Земли.

В том числе:

- создание инструментального комплекса, включающего датчики параметров электромагнитного поля, плазмы для мониторинга состояния ионосферы с борта КА. Отработка методик проведения измерений и технических решений при создании приборов полезной нагрузки и систем КА;

- изучение космической погоды и ионосферных откликов земных катастроф;
- создание веб-ресурса данных для обеспечения доступа заинтересованных пользователей к архиву данных измерений и средствам их обработки и анализа;

#### **Основные задачи проекта:**

- разработать компоненты комплекта научного оборудования НТКА и системы управления целевой аппаратурой КА, включающей технические и программные средства;

- разработать технологический образец научной полезной нагрузки НТКА;
- разработать программно-математическое и техническое обеспечение для приема, архивирования и формирования базы данных измерений с НТКА, тематической обработки спутниковых научных данных и для обеспечения доступа пользователей к научной информации НТКА.

Актуальность проекта вытекает из необходимости создания отечественной космической отрасли. Космические исследования в Казахстане могут быть подняты на качественно новый уровень, если обеспечить их техническими и

технологическими средствами проведения научных экспериментов на борту космических аппаратов научно-технологического назначения собственного производства. Актуальность проекта «КС НТН» обусловлена также рядом обстоятельств, связанных с происходящим сегодня ростом техногенного воздействия на космическую среду: загрязнением околоземного пространства при стартах ракет, космическим мусором, воздействием линий электропередач и других промышленных источников электромагнитного излучения на космическую плазму и пр. Изучение техногенных эффектов в ионосфере является одной из центральных задач проекта «КС НТН».

НТКА относятся к классу микро и нано спутников. В то же время они обладают полноценными функциональными возможностями. Учитывая, что создание НТКА и соответствующей наземной инфраструктуры сложный, многоэтапный процесс, созданию отечественного КА должна предшествовать подготовительная работа - от научно-изыскательских и проектных разработок - до создания экспериментальных образцов бортового научного оборудования и необходимых для их функционирования технических и программных средств.

Другой задачей проекта является диагностика ионосферных проявлений космической погоды. Функционирование и работоспособность многих средств наземной и особенно космической связи существенно зависит от космических факторов. Например, вариации полного электронного содержания ионосферы ограничивают точность глобального позиционирования, атмосферные возмущения при воздействии солнечных вспышек нарушают траектории низкоорбитальных КА и т.д. Всё это диктует необходимость систематического контроля и прогнозирования состояния космической среды [1].

Значительный интерес также представляет изучение ионосферного отклика на наземные источники энергии. В последние годы опубликованы работы, где такой отклик был подтвержден – в наблюдениях за перемещающимися ионосферными возмущениями над землетрясениями и цунами [2,3], динамо-токами в ионосфере над погодными фронтами [4], ионосферными возмущениями от стартов ракет [5] и т.д. Космический эксперимент, направленный на систематическое изучение воздействий на ионосферу снизу, позволит оценить практическую значимость такого рода наблюдений для контроля природных и техногенных катастроф, происходящих на Земле.

Актуальность реализации проекта обусловлена ещё и тем обстоятельством, что, после прекращения в 2010 г. работы спутника DEMETER (Франция), на орбите не осталось КА, осуществляющих мониторинг ионосферы (ныне действующие КА «Чибис», «Сич-2» и др. не обладают достаточно полными диагностическими возможностями). Проект «КС НТН» призван частично заполнить этот пробел.

**Реализация.** Комплекс научной аппаратуры «НТКА» устанавливается на спутниковую платформу для проведения научных и технологических космических экспериментов на основе доступных комплектующих. Запуск планируется ориентировочно в 2015 году. Планируемая орбита – круговая солнечно-синхронная, с наклоном  $98^\circ$ , высотой 650-670 км.

**Ожидаемые результаты.** Будет создан комплект научной спутниковой

аппаратуры для решения задач, поставленных учеными Казахстана с участием специалистов Украины, России, Франции. Будет создана база данных спутникового мониторинга состояния ионосферы, проведено изучение связи динамических процессов в ионосфере с космическими и земными источниками, разработаны рекомендации относительно использования низкоорбитальных КА для служб космической погоды и диагностики природных и техногенных катастроф.

#### **4.10.2 Научное обоснование**

Ионосфера представляет собой зону, через которую происходит взаимодействие Земли с ближним космосом. На состояние ионосферы влияют геофизические процессы – грозы, солнечные вспышки, ураганы, цунами, землетрясения и предшествующие им процессы, другие природные катаклизмы, а также техногенные факторы – старты ракет, ядерные и промышленные взрывы, работа линий электропередач и пр. Систематические и долгосрочные измерения параметров ионосферы – ключ к статистически обоснованному изучению механизмов формирования ионосферного отклика на воздействия сверху и снизу.

За всю космическую эру ионосферных спутников было сравнительно мало – до 20. Поэтому каждый новый ионосферный эксперимент актуален. Об этом свидетельствует успешный опыт работы на орбите в течение 6.5 лет спутника DEMETER.

В настоящее время в мире готовится сразу несколько спутниковых проектов - китайский CSES, датский «Swarm», совместный российско-британский проект «TwinSat», украинский «Микросат» и как его развитие, проект группировки 3-х спутников «Ионосат» [6]. Эти проекты близки по своей миссии, назначению спутников, имеют схожие по параметрам бортовые научные приборы. В связи с этим естественным образом формируется научный ионосферный кластер спутников.

Резюмируя, назовём основные приоритеты современных спутниковых исследований ионосферы:

1. Изучение морфологической структуры околоземного космоса – высотного, широтного, суточного и т.д. изменения космических параметров. На этой основе – уточнение существующих моделей верхней атмосферы, ионосферы и магнитного поля Земли;
2. Изучение динамических процессов в ионосфере как проявлений солнечно-земных связей. Диагностика и предсказание космической погоды;
3. Изучение отклика ионосферы на воздействия снизу. Мониторинг ионосферных проявлений природных и техногенных катастроф.

#### **4.10.3 Задел**

В ходе выполнения Государственной программы «Развитие космической деятельности в Республике Казахстан» на 2005-2007 годы, исходя из потребностей ученых Казахстана, были разработаны технические задания, технические предложения и технико-экономическое обоснование (ТЭО) на все компоненты космической системы научного назначения [7]. В 2008-2011 гг. в АО «НЦКИТ»

было разработано научно-методическое обеспечение и технологии обработки, анализа и распространения информации космической системы научного назначения, отработанное на данных зарубежных космических аппаратов. В АО «НК «Казахстан Гарыш Сапары» совместно с АО «НЦКИТ» в 2011 году разработано ТЭО КС НТН, которое прошло ряд обязательных экспертиз.

В 2012-2013 годах была разработана имитационная компьютерная модель научного блока НТКА в среде MatLab|Simulink и инженерная модель научного блока – реально работающего наземного аналога комплекта научной аппаратуры, установка которого планируется на борту НТКА. На этих моделях отрабатываются технологии проведения измерений, бортовой обработки, накопления и передачи данных на землю.

Ведутся подготовительные работы по созданию служебной платформы НТКА, необходимых наземных структур. Эти работы проводятся в координации с соответствующими проектами Национального космического агентства Республики Казахстан. Работы по проекту основываются на зарубежном опыте, в первую очередь, Франции, Украины и России.

Из сказанного следует, что в Казахстане имеются все необходимые предпосылки и существенный задел для успешной реализации проекта.

#### **4.10.4 Режимы работы научной аппаратуры**

Определены два режима работы научной аппаратуры – это мониторинг электромагнитных полей в глобальном масштабе (над всей поверхностью Земли, рисунок 1) с проведением на борту спектрального анализа электромагнитных данных.

Второй режим - это режим региональных измерений (над территорией Казахстана, рисунок 2) для измерения волновой формы электромагнитных полей. Регион ограничен географическими координатами 30-60 градусов северной широты и 50-90 градусов восточной долготы, что покрывает всю территорию Казахстана и его сопряженных областей, представляющих интерес с точки зрения исследования локальных геодинамических процессов.

Кроме электромагнитного измерительного оборудования в состав полезной нагрузки включен измеритель полного электронного содержания (ПЭС), по данным которого будет восстанавливаться вертикальный профиль концентрации ионосферной плазмы над заданным регионом. В отличие от остальных приборов, измеритель ПЭС зондирует ионосферу не вдоль траектории КА, а только тогда, когда зона расчета вертикального профиля радиозатменных наблюдений попадает в казахстанский регион, а это бывает на удалении НТКА от региона вдоль лучей сигналов GPS-спутников более тысячи км.

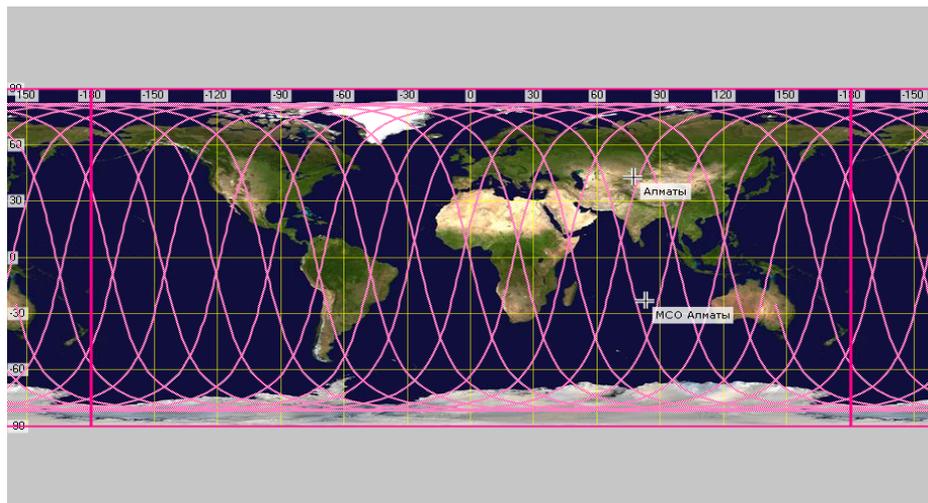


Рисунок 1 - Трассы КА для режима мониторинга (суточный сценарий)

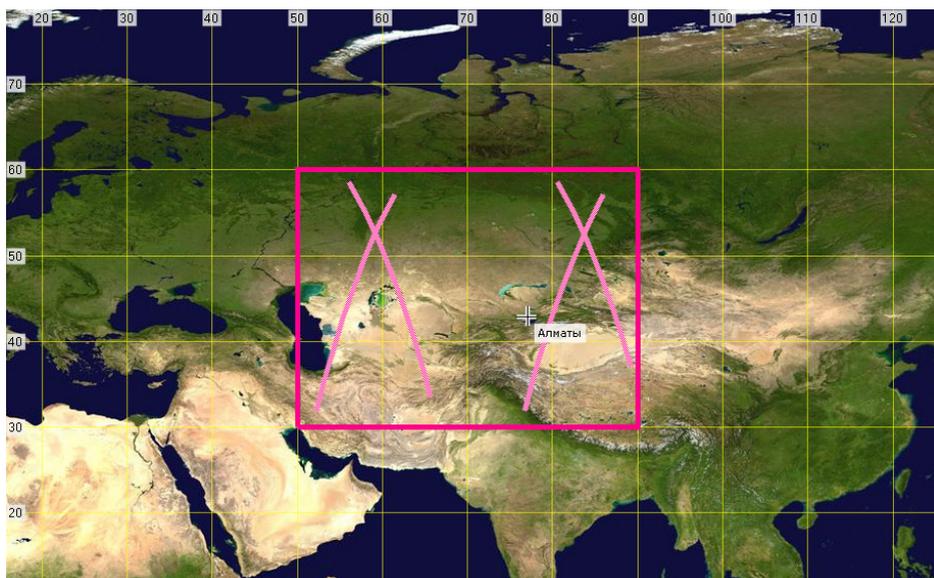


Рисунок 2 - Трассы КА над заданным районом для регионального режима за сутки

Выбранные режимы измерений в свою очередь позволили оценить необходимые объемы потоков информации без потери их научной значимости. Это менее 0.6 Гб информации в сутки. Для сброса этой информации на землю в S-диапазоне 2-4 раза в сутки необходима скорость не менее 4 Мбит/сек (рисунок 3).

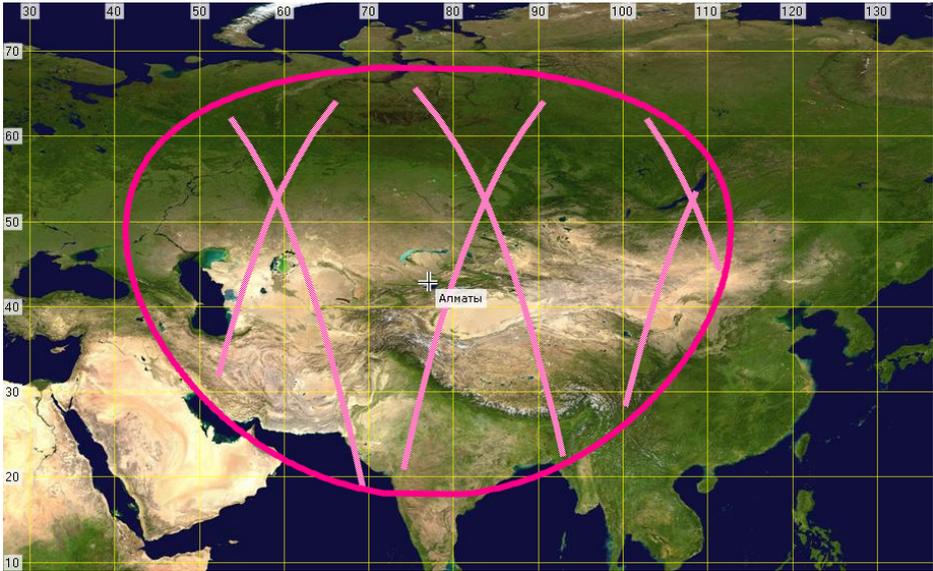


Рисунок 3 - Трассы КА в зоне радиовидимости НКУ г. Алматы за сутки

Технологическая схема проведения измерений и бортовой обработки данных приведена на рисунке 4.

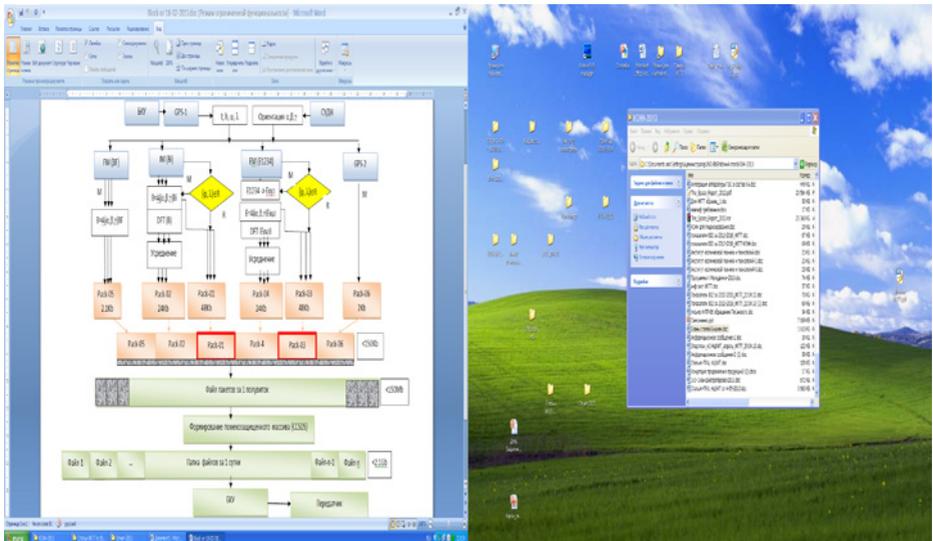


Рисунок 4 – Технологическая схема проведения измерений и бортовой обработки данных

Рассмотрим подробнее алгоритм проведения измерений и бортовой обработки данных, по схеме, приведенной на рисунке 4.

Служебный GPS-1 приемник через бортовой комплекс управления (БКУ) обеспечивает выдачу информации о времени и текущем положении спутника ( $t$ ,  $h$ ,  $\varphi$ ,  $\lambda$ ) – мировое время, высота, географическая широта и долгота спутника. Эти данные опрашиваются с частотой 0.1 Гц и нужны для пространственно-временной привязки пакетов данных по каждому прибору.

Система управления движением и навигации (СУДН) спутника выдает данные об ориентации платформы КА относительно орбитальной системы координат – углы ориентации (крен, тангаж, рыскание). Эти углы необходимы для корректировки векторных измерений магнитных и электрических полей.

Феррозондовый магнитометр FM измеряет в режиме мониторинга 3 компоненты квазипостоянного магнитного поля Земли с частотой 1 Гц, преобразует их в орбитальную систему координат путем умножения на матрицу перехода, зависящую от углов ориентации, и формирует по ним пакет данных.

Индукционный магнитометр IM измеряет в режиме мониторинга 3 компоненты переменного магнитного поля в диапазоне частот до 20 кГц (40960 измерений в секунду), преобразует их в орбитальную систему координат, осуществляет быстрое преобразование Фурье временного ряда, что приводит к получению 20480 точек спектральной мощности магнитного поля и проводит их усреднение путем нахождения средних арифметических значений для каждых 20 точек спектра. Это уменьшает объем спектра до 1024 точек в 1 секунду. На каждом такте измерений осуществляется проверка на попадание спутника в выбранный регион ( $\varphi$ ,  $\lambda$ )DR. Полученные данные формируются в пакет.

Электрометр EM содержит 4 датчика, с которых принимается с дискретностью 40960 измерений в секунду 4 ряда, по которым производится вычисление 3-х компонент напряженности электрического поля. Дальнейшая процедура обработки аналогична индукционному магнитометру.

Двухчастотный GPS-приемник производит измерения параметров, необходимых для расчета ПЭС. По программе, закладываемой с земли на борт 1 раз в сутки, определяются GPS-спутники, необходимые для проведения радиозатменных наблюдений над казахстанским регионом и производится регистрация данных, необходимых для восстановления ПЭС при наземной обработке данных.

Приведенная схема реализуется под управлением бортового вычислительного комплекса (БВК) с системой сбора, обработки и накопления информации (ССНИ). Бортовой вычислительный комплекс НТКА является составной частью полезной нагрузки, включающей датчики, блоки электроники (предусилители и аналого-цифровые преобразователи (АЦП), программируемые интегральные логические схемы (ПЛИС) для проведения вышеуказанных вычислительных процедур, физические интерфейсы и программные драйверы для сопряжения всех компонентов научного блока (НБ) спутника. БВК в составе НБ выполняет функции по управлению работой научных приборов и осуществляет операции по сбору данных со всех приборов, их обработку и подготовку для передачи на НКУ.

Кроме указанных выше функций на БВК также накладываются требования, касающиеся комплекта приборов в целом:

1. Из записанных автономных пакетов по каждому прибору и режиму работы формируется единый файл пакетов, при этом файл компонуется по полувиткам орбиты.

2. Для подготовки данных к передаче на Землю производится формирование помехозащищенного файла в соответствии с рекомендациями CCSDS [8].

3. Из этих файлов формируется их, архивный файл в течение полусуток (суток) в зависимости от количества сеансов сброса данных.

4. При очередном сеансе связи в зоне радиовидимости КА архивный файл пересылается через БКУ на передатчик для последующего сброса на Землю.

Отметим, что разработанные форматы всех пакетов сформированы таким образом, чтобы обеспечивалось однозначное восстановление данных при наземной научной обработке данных.

#### 4.10.5 Комплекс научной аппаратуры

Учитывая бурно развивающиеся нанотехнологии, создание и успешное использование на спутниках миниатюрных датчиков и микроэлектронной бортовой аппаратуры, выбор спутниковой научной аппаратуры был ориентирован на приборы, небольшие по массогабаритам и с минимальным энергопотреблением [9, 10].

Состав и параметры комплекса научной аппаратуры (КНА) «НТКА» представлен в таблице 1.

Используемая аппаратура	Измеряемые величины	Характеристики
Трехкомпонентный феррозондовый магнитометр постоянного поля FM	<b>Вектор магнитного поля В:</b> Диапазон частот DC - 1 Гц Динамический диапазон $\pm 65000$ нТл Шум Вес датчика Вес блока электроники Габариты датчика Габариты блока электроники Потребляемая мощность	$< 15$ пТ/Гц <sup>-1/2</sup> на 1 Hz $\leq 20$ г $\leq 80$ г 20x20x20 мм 90x50x10 мм $< 0.33$ Вт
Трехкомпонентный индукционный магнитометр IM	<b>Вектор магнитного поля В:</b> частотный диапазон 0,1 Гц - 40 кГц шум Вес датчика Вес блока электроники Габариты датчика Габариты блока электроники Потребляемая мощность	0.5 пТ/sqrt(Hz) на 1кГц 12 г $\leq 80$ г 19x19x19 мм 90x50x10 мм $< 0.6$ Вт

Трехкомпонентный электрометр EM	<b>Вектор электрического поля E:</b> частотный диапазон 0,1 Гц - 40 кГц шум Вес Габариты датчика Потребляемая мощность	$< 10^{-6} \text{ V/ Гц}^{1/2}$ $\leq 130 \text{ г}$ $\leq 76 \leq 178 \text{ мм}$ $< 0.2 \text{ Вт}$
Измеритель полного электронного содержания ТЕС	Частота: L1, L2 - 20 каналов Общий вес Потребляемая мощность	$< 200 \text{ г}$ 1.5 Вт
Бортовой вычислительный комплекс с системой сбора и накопления информации	Входной информационный поток: до Выходной информационный поток: до Объем накопителя: Вес Потребляемая мощность	100 Мбит/с 4 Мбит/с 5 ГБ $< 1.5 \text{ кг}$ $< 5 \text{ Вт}$

Таблица 1. Бортовой комплекс научной аппаратуры проекта «НТКА»

Из таблицы видно, что рабочие диапазоны магнитометра квазипостоянного поля FM (до 1 Гц) и индукционных магнитометров (выше 0.1 Гц) перекрываются между собой, что обеспечивает измерение вектора магнитного поля в сплошном диапазоне 0...20 кГц. Также, в полосе частот 0.1 Гц-20 кГц обеспечивается синхронная регистрация вектора магнитного поля и вектора электрического поля вдоль траектории КА.

Кроме электромагнитного измерительного оборудования в состав полезной нагрузки включен измеритель полного электронного содержания ТЕС, по данным которого будет восстанавливаться вертикальный профиль концентрации ионосферной плазмы. Массо-габаритные и энергетические параметры комплекта научной аппаратуры определяют параметры платформы, необходимой для ее функционирования в выбранных режимах. Это может быть платформа типа CubSat 3U-6U.

#### **4.10.6 Организация приёма научной информации, управление работой спутника, обработки, хранения и распространения данных**

Планируется проводить отработку системы управления научным блоком приборов и проведение ряда других технологических экспериментов.

1. Наземная станция обеспечивает управление КА и принимает телеметрическую и научную информацию по радиолинии S-диапазона;

2. Центр управления полетом (ЦУП) в соответствии с координационным планом осуществляет управление работой спутника - выделяет принятые файлы научных данных и передаёт их для тематической обработки наряду с сопроводительной информацией (оперативные программы управления КА, время, местоположение и ориентация КА и т.д.); производит распаковку научной информации по отдельным приборам и передаёт откалиброванные данные для размещения и хранения на сервере.

Результаты космического проекта должны быть доведены до конечного пользователя – ученых и исследователей. Поэтому обязательной составляющей проекта является создание базы данных НТКА, доступной пользователям через сеть Интернет и обеспечивающей доступ не только к данным КА, но и к средствам их обработки проекта с удобным и современным веб-интерфейсом.

### **Заключение**

Реализация проекта позволит создать научные и технологические основы для отечественного проектирования, производства, сборки и испытаний компонентов спутникового научного оборудования, предназначенного для изучения ближнего космоса и решения научных и прикладных задач с помощью КА.

Анализ международного опыта показывает, что оптимальный путь развития научных космических исследований – вхождение в международные проекты. Такая форма организации работы позволит специалистам РК приобрести уникальный опыт научной работы в рамках международной коллаборации. Работы в этом направлении ведутся и в настоящее время установлены рабочие контакты с рядом научных организаций и предприятий космической отрасли России (ИЗМИРАН, Геоскан), Украины (ГКБ «Южное», ИКИ и ЛЦИКИ НАНУ ГКАУ), Франции (CNRS) и др.

Задачи по созданию и развитию космической отрасли Казахстана предполагают развитие как новых космических технологий, так и сопряженной с ней фундаментальной науки, обеспечивающей разработку и решение перспективных задач, технологические условия для их реализации. По широте поставленных для научно-технологических КА задач проект после его реализации может стать конкурентноспособным имеющимся зарубежным аналогом, а ожидаемые результаты будут отвечать передовым достижениям мировой космической науки, техники и технологий. В то же время создание научных и технологических основ собственного опытно-экспериментального производства, сборки и испытаний компонентов научных и служебных систем КА снизит зависимость отрасли от зарубежных поставщиков.

### **Список литературы**

[1] *Г. В. Лизунов, О. П. Фёдоров, В. Е. Корепанов.* Космический проект «ИОНОСАТ-МИКРО»: задачи и комплекс научной аппаратуры. Космічні дослідження в Україні 2010-2012 // Звіт ІКД НАНУ-ДКАУ. Київ, 2012. С. 16-23. CD.

[2] *Rolland, L.M., Lognonn'e P., Astafyeva E., Kherani E.A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H.* The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, 2011, v. 63, v. 63 (No. 7), pp. 853-857.

[3] *Скореход Т.В., Лизунов Г.В.* Локализованные пакеты акустико-гравитационных волн в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*, 2012, т.52, №1, с. 1-6.

[4] *Ямпольский Ю.М., Зализовский А.В., Литвиненко Л.Н., Лизунов, К. Гровс*

*Г.В., Молдвин М.*. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью. Радиофизика и радиоастрономия, 2004, т.9, №2, 130-151.

[5] *Черногор Л.Ф.*, Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. – Х.: ХНУ имени *Каразина В.Н.*, 2009. – 386 с.

[6] *Korepanov, V., Lizunov G., Fedorov O., Yampolsky Yu., Ivchenko V.* Ionosat – ionospheric satellite cluster. Adv. Space Res., 2008, v. 42, pp. 1515-1522.

[7] *Молдабеков М.М., Инчин А.С., Шпади Ю.Р., Лозбин А.Ю.* Проект создания казахстанской космической системы научного назначения // Вестник ФГУП НПО им. *Лавочкина С.А.* – Москва, 2010 г. - №2. - С.11-16.

[8] CCSDS - <http://public.ccsds.org/publications/BlueBooks.aspx>.

[9] *Belyayev S., and Ivchenko N.*, “Microsatellite digital magnetometer SMILE -present state and future trends”, Geophysical Research Abstracts, vol.12, EGU2010-2349. EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria.

[10] *Todd Humphreys*, UT Austin Aerospace Dept. CubeSat-Sized GNSS Radio Occultation/ Experiments. - <http://radionavlab.ae.utexas.edu>.

## 4.11 РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И НАВИГАЦИИ МИКРОСПУТНИКА

*Молдабеков М.М.<sup>1</sup>, Ахмедов Д.Ш.<sup>2</sup>, С.А. Елубаев<sup>2</sup>, Н.К. Джамалов<sup>2</sup>,  
К.А. Алипбаев<sup>2</sup>, А.С. Сухенко<sup>2</sup>, Т.М. Бопеев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальное космическое агентство РК  
<sup>2</sup>ДТОО «Институт космической техники и технологий»

### 4.11.1 Введение

С развитием вычислительной и космической техники появилась возможность создавать космические аппараты, имеющие малые массогабаритные размеры и, в то же время, обладающие полноценными функциональными возможностями. Разработка и запуск таких аппаратов обходятся гораздо дешевле и они позволяют с меньшими затратами проводить различные исследовательские работы. В связи с этим в последние годы во всех космических странах уделяется большое внимание на разработку микроспутников.

Система управления движением и навигации микроспутника, как и любого другого космического аппарата, является одним из важных элементов космического аппарата. От ее работы зависит работа всех остальных подсистем микроспутника и качество выполняемых им работ. В связи с этим на разработку систем управления движением и навигации микроспутника уделяется большое внимание. При этом создаются различные имитационные модели, экспериментальные и опытные образцы, при помощи которых многократно тестируются программно-математический аппарат, функциональность и работоспособность системы управления движением и навигации, проводится обработка режимов ее работы и т.д. с целью максимально уменьшить риск отказа системы в полетных условиях.

### 4.11.2 Определение требований к экспериментальному образцу СУДН и ее состав

Одной из важнейших проблем, которую приходится решать практически в течение всего полета подавляющего большинства искусственных спутников, является обеспечение их требуемого углового движения (ориентации). Например, спутник нижним днищем, на котором установлены антенна направленного действия и объектив видеокамеры, должен быть направлен на центр Земли, а солнечные батареи направлены на солнце. Для проведения экспериментов и изучения явлений, связанных с геомагнитным полем и взаимодействием с ним заряженных частиц, оси чувствительных элементов целесообразно направить определенным образом относительно вектора напряженности этого поля. При наблюдении различных участков звездного неба или поверхности Земли требуется систематическое изменение углового положения КА или, наоборот, заданная ось КА должна быть направлена постоянно в одну и ту же точку небесной сферы или Земли и так далее [1].

Таким образом, спутнику придется нужное угловое положение относительно

заданных ориентиров поворотом вокруг центра масс (в качестве таких ориентиров выступают видимые небесные и наземные объекты - звезды, Солнце, линии горизонта и др.) или направления в пространстве (местная вертикаль, вектор напряженности геомагнитного поля, вектор скорости набегающего потока воздуха), которые можно определить по измерениям приборов [1].

В зависимости от целей и задач микроспутника формируются основные требования к СУДН КА. Рассматриваемый в статье микроспутник имеет технологическое назначение, предполагающее отработку режимов управления системы управления движением и навигации и её программно-математического обеспечения. Кроме того для отработки режимов сеанса связи по получению научной информации на микроспутнике предполагается установить дополнительно научную аппаратуру. В связи с этим, для экспериментального образца СУДН были разработаны следующие требования:

- гашение угловой скорости микроспутника;
- обеспечение ориентации солнечных батарей на Солнце с точностью не хуже 5 град;
- обеспечение ориентации КА в надир на теневой стороне орбиты с точностью не хуже 0.1 град;
- наведение по заданному профилю с точностью не хуже 0.1 град.

На основании требований к СУДН микроспутника сформированы основные его режимы управления:

- безопасный режим;
- номинальный режим.

В безопасном режиме должно быть обеспечено гашение угловой скорости КА и ориентация КА вдоль линий магнитного поля Земли, далее должна быть обеспечена трёхосная ориентация солнечных батарей на Солнце.

В номинальном режиме должно быть обеспечено наведение КА (трёхосная ориентация) по заданному профилю в сеансном режиме, также должна быть обеспечена ориентация КА в надир на теневой стороне орбиты. На солнечной стороне орбиты в дежурном режиме должна быть обеспечена трёхосная ориентация солнечных батарей на Солнце.

На основании требований к СУДН микроспутника в целом и требований к режимам управления определён состав СУДН микроспутника:

- датчики определения ориентации: магнитные датчики, определяющие компоненты вектора магнитной индукции Земли, солнечные датчики, предназначенные для определения ориентации космического аппарата по Солнцу, гироскопические датчики, определяющие угловую скорость микроспутника;
- исполнительные органы системы ориентации: маховики и электромагнитные исполнительные органы;
- аппаратура спутниковой навигации;
- бортовой комплекс управления, осуществляющий контроль всех компонентов системы управления движением и навигации микроспутника и управление положением микроспутника.

### 4.11.3 Разработка экспериментального образца гироскопического датчика микроспутника

Гироскопические датчики предназначены для определения угловой скорости и углового положения КА. В соответствии с конструктивным исполнением эти датчики могут быть одноосными, двухосными и трехосными. В случае одноосных датчиков для определения трех компонент угловой скорости и углового положения КА необходимо использовать три датчика, оси расположения которых параллельны главным осям инерции КА. На выход датчиков подаются сигналы (напряжение), пропорциональные соответствующим компонентам угловой скорости КА, которые затем обрабатываются бортовым комплексом управления.

Структурно экспериментальный образец гироскопического датчика состоит из следующих компонентов (рисунок 1):

- модуль измерения угловой скорости и углового положения, который представляет собой одноосный гироскопический датчик (гироскопический датчик LY530ALH);
- модуль обработки и фильтрации данных, представляющий собой микроконтроллер, производящий обработку и фильтрацию данных и обеспечивающий их передачу в бортовой комплекс управления (микроконтроллер ATmega2560);
- модуль передачи данных, который представляет собой беспроводной приёмо-передатчик и обеспечивает передачу данных из модуля обработки и фильтрации данных в бортовой комплекс управления (беспроводной приёмо-передатчик Xbee Pro S2B).

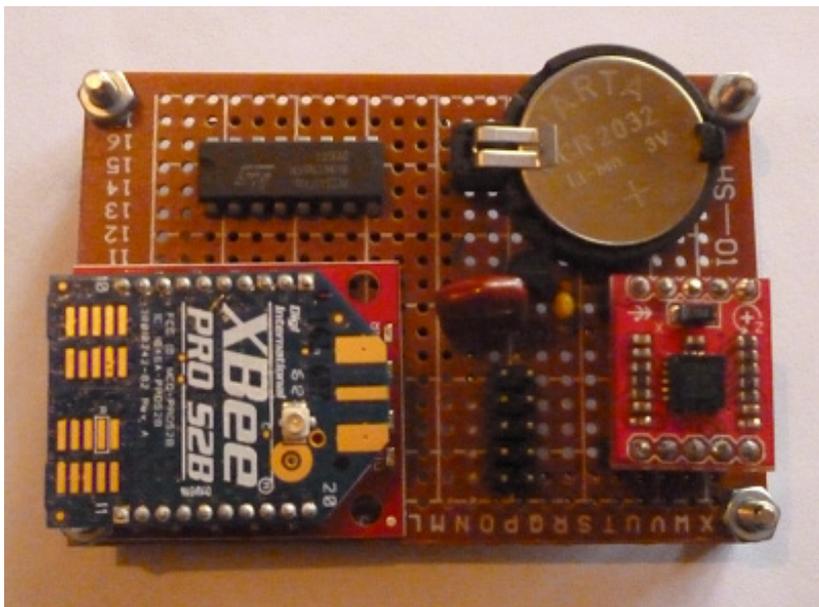


Рисунок 1 – Экспериментальный образец гироскопического датчика

#### 4.11.4 Разработка экспериментального образца инерционного исполнительного органа маховика

Одним из важных элементов СУДН являются ее исполнительные органы. На практике в качестве исполнительных органов СУДН довольно часто используются маховики, так как они позволяют с достаточно высокой точностью ориентировать космический аппарат в пространстве.

При изменении скорости маховика управляющий момент воздействует на КА и он начинает вращаться в обратном направлении по отношению к маховику. При этом согласно закону сохранения момента количества движения при условии, что внешние моменты малы по сравнению с моментом маховика, можно записать [2, 3]

$$\omega_k = \frac{J_i}{J_k} \omega_i \quad (1)$$

где  $\omega_k$  -угловая скорость микроспутника;

$J_i$  - момент инерции маховика;

$J_k$  - момент инерции микроспутника;

$\omega_i$  - угловая скорость маховика.

Из последнего уравнения очевидно, что угловая скорость микроспутника прямопропорциональна угловой скорости маховика.

При этом закон изменения угловой скорости маховика определяется согласно следующим условиям:

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_i - \omega_i(t) \text{ ідè } \varphi - \varphi_1 > \Delta\varphi, \\ \omega_i \text{ ідè } |\varphi_1 - \varphi| < \Delta\varphi, \\ \omega_i + \omega_i(t) \text{ ідè } \varphi_1 - \varphi > \Delta\varphi, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\omega_i = const$  - скорость маховика, когда угловое положение микроспутника находилось в пределах допустимого, рад/сек;

$\omega_i(t)$  - скорость маховика после включения двигателя маховика по управляющим командам, поступающим из устройства управления, рад/сек;

$\varphi$  - фактическое угловое положение микроспутника, измеренное датчиками положения, например механическими или оптическими гироскопическими датчиками, рад;

$\varphi_1$  - программное (заданное) угловое положение микроспутника, рад;

$\Delta\varphi$  - допустимый угол, на который микроспутника может отклоняться от программного (заданного) положения, рад.

Разработан экспериментальный образец инерционного исполнительного органа – маховика микроспутника, который состоит из маховика и электродвигателя. Управление маховика осуществляется с помощью электродвигателя, закон управления которого задается в форме (2).

Разработанный экспериментальный образец инерционного исполнительного органа – маховика приведен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Экспериментальный образец инерционного исполнительного органа – маховика

#### **4.11.5 Макет одноосной системы ориентации микроспутника на базе маховика и гироскопического датчика**

Для тестирования работы экспериментального образца инерционного исполнительного органа – маховика, его математической модели, алгоритмов работы и программного обеспечения, а также работы экспериментального образца гироскопического датчика изготовлен макет одноосной системы ориентации микроспутника на базе экспериментального образца гироскопического датчика и маховика.

Общий вид макета приведен на рисунке 3. Макет состоит из следующих основных частей: подвижной платформы, маховика как исполнительного органа, гироскопического датчика, модуля обработки данных (микроконтроллер) и модуля управления (ПК). Кроме того для передачи информации в модуль управления (на ПК) на платформе и на ПК установлены беспроводные приемопередатчики (рисунок 1, 4). Для питания электродвигателя маховика и приемопередатчика на платформе установлены аккумуляторные батареи.



Рисунок 3 – Общий вид макета одноосной системы ориентации микроспутника

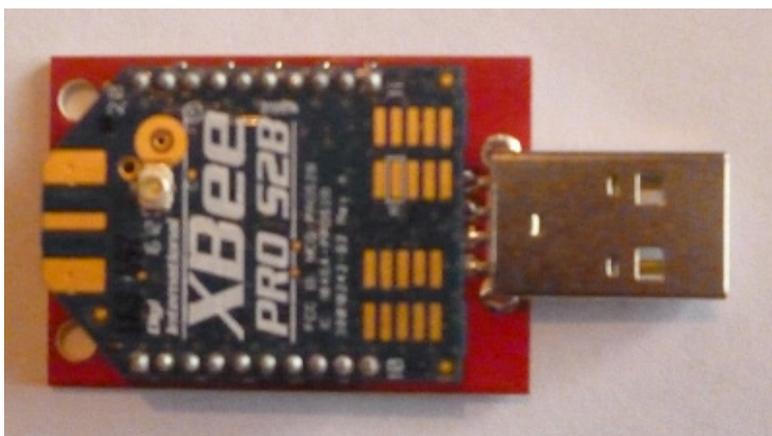


Рисунок 4 – Модуль приёма данных

Для макета разработано программное обеспечение, состоящее из двух частей – прикладного программно-математического обеспечения и аппаратного программно-математического обеспечения.

Прикладное программно-математическое обеспечение устанавливается на ПК и предназначено для обеспечения интерактивного взаимодействия пользователя с макетом. Основными задачами прикладного программно-математического обеспечения являются:

- обеспечение ввода пользователем расчетных значений управляющего момента и направления вращения маховика и передача данных значений макету,

где на их основе система воспроизводит одноосную ориентацию подвижной платформы относительно ее оси вращения;

- обеспечение ввода пользователем значения требуемого углового положения подвижной платформы и передача этого значения макету, где на основе этой информации система автоматически рассчитывает требуемый управляющий момент и направление вращения исполнительного органа – маховика с последующей передачей ему управляющих команд;

- прием и отображение данных от макета о его текущем состоянии, в состав которых входит информация о текущем угловом положении подвижной платформы, заданная пользователем и автоматически рассчитанные значения управляющих моментов.

Аппаратное программно-математическое обеспечение выполняется модулем обработки данных, входящим в состав макета и выполняет следующие функции:

- чтение данных с гироскопического датчика;
- определение углового положения платформы на основе данных гироскопического датчика;
- расчет сигнала управления;
- беспроводная передача данных о текущем состоянии макета;
- прием команд управления от прикладного программно-математического обеспечения ПК.

Таким образом, макет позволяет моделировать управление угловым положением подвижной платформы относительно ее оси вращения и выполняет следующие функции: одноосная ориентация и визуализация текущего углового положения, угловой скорости и управляющего момента, которые позволяют проводить исследование режимов работы системы ориентации.

### **Заключение**

Разработаны экспериментальные образцы гироскопического датчика и инерционного исполнительного органа - маховика. Для проверки работы разработанных экспериментальных образцов изготовлен макет одноосной системы ориентации на базе экспериментального образца гироскопического датчика и маховика, позволяющий отрабатывать режимы работы экспериментального образца СУДН микроспутника.

### **Список литературы**

- [1] *Овчинников М.Ю.* Системы ориентации спутников: От Лагранжа до Королева //Соросовский Образовательный Журнал. -1999. - №12. -С. 91-96.
- [2] *Лачуга Ю.Ф., Ксендзов В.А.* Теоретическая механика. – М.: КолосС, 2005. -576 с.
- [3] *Овчинников И.Е., Лагун А.В.* Динамика системы ориентации космического летательного аппарата с двигателями-маховиками/ Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2009, № 5(63)

## 4.12 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗВЕЗДНОГО ДАТЧИКА

*Молдабеков М.М.<sup>1</sup>, Ахмедов Д.Ш.<sup>2</sup>, Елубаев С.А.<sup>2</sup>, Джамалов Н.К.<sup>2</sup>, Шамро А.В.<sup>2</sup>, Алипбаев К.А.<sup>2</sup>, Бопеев Т.М.<sup>2</sup>, Сухенко А.С.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальное космическое агентство РК

<sup>2</sup>ДТОО «Институт космической техники и технологий» АО «НЦКИТ»

Звёздные датчики являются оптоэлектронными устройствами, для автономного определения положения КА в пространстве. За последние годы звёздные датчики приобретают всё большую популярность и важность среди датчиков, используемых в системе управления движением и навигации КА ДЗЗ. В связи с тем, что в ближайшем будущем в Республике Казахстан планируется разработка КА ДЗЗ своими силами, приобретает актуальность разработка собственных отечественных комплектующих и компонентов для спутников, одним из которых является звездный датчик.

Силами отечественных специалистов планируется разработать собственный звездный датчик. На первом этапе будет разработан экспериментальный образец звездного датчика. Основной целью данного этапа является отработка основных режимов работы и программно-математического обеспечения звездного датчика. На данный момент уже проведены работы по определению требований к звездному датчику, его предварительному и детальному проектированию, разработке его оптической системы. На следующем этапе на основе экспериментального образца звездного датчика планируется разработать его опытный образец для последующего его использования на казахстанских КА ДЗЗ.

### **4.12.1 Этапы разработки экспериментального образца звездного датчика**

Разработка экспериментального образца звездного датчика является первым этапом на пути получения его отработанного опытного образца.

На предыдущих этапах проведены работы по определению требований к экспериментальному образцу звездного датчика, проведено предварительное и детальное проектирование экспериментального образца звездного датчика и его компонентов (рисунок 1).



Рисунок 1 – Этапы разработки экспериментального образца звездного датчика

#### 4.12.2 Определение требований к экспериментальному образцу звездного датчика

Общие требования к экспериментальному образцу звездного датчика разрабатывались на основе проведенного анализа звездных датчиков ведущих производителей: SED 36, ASTRO 15, A – STR, ALTAIR-HB, HAST, CT-602, CT-633, Miniature Star Tracker, БОКЗ-М [1].

В результате были определены диапазоны значений для основных параметров оптической системы экспериментального образца звездного датчика: поле зрения – 20-25 градусов, диаметр входного зрачка: 20-25мм, что соответствует максимальным звездным величинам 5,0-5,5. Данные значения поля зрения и диаметра входного зрачка обеспечивают наличие более трёх звёзд в кадре для определения ориентации звездного датчика. Из представленных диапазонов значений параметров оптической системы наиболее оптимальными были приняты значения: поле зрения – 20 градусов, диаметр входного зрачка - 25 мм, диаметр пятна рассеяния - 85% энергии в 39 мкм.

В качестве детектора звездного датчика рассмотрена матрица КМОП размерностью от 512x512 до 2048x2048, обеспечивающая низкий уровень собственных электронных шумов и относительно высокую квантовую эффективность: 40-50%.

Также были разработаны требования к компонентам блока электроники, системному и программно-математическому обеспечению. Блок электроники экспериментального образца ЗД должен состоять из ПЛИС предобработки изображения с головки звездного датчика, центрального процессора для распознавания конфигурации центроидов и вычисления ориентации КА, блоков памяти, интерфейсных компонентов для обеспечения связи ЗД с бортовым комплексом управления КА, а также блока питания.

#### 4.12.3 Предварительное проектирование экспериментального образца звездного датчика

В процессе предварительного проектирования произведен выбор варианта оптической системы, при этом были рассмотрены три варианта оптической

системы: семилинзовая, шестилинзовая и пятилинзовая (рисунок 2 - 4). Для каждого варианта оптической системы было проведено проектирование и расчет. Проектирование и расчет производилось средствами программной системы ZEMAX, которая на данный момент является самым эффективным средством для расчета оптических систем.

В ходе расчетов было исследовано изменение качественных характеристик оптических систем: функции рассеяния точки, изменения формы и диаметра пятна рассеяния для различных углов поля зрения и концентрации энергии излучения в пятне рассеяния.

Функция рассеяния точки, полученная для семилинзовой оптической системы (рисунок 2 а) показала, что изображение не имеет ярко выраженных максимумов интенсивности, а также удовлетворительную равномерность размазывания по фокальной плоскости (не более 90 мкм). График распределения энергии в зависимости от радиуса пятна рассеяния (рисунок 2 в) показал, что более 95% энергии от точечного источника концентрируются в пятне радиусом 45 мкм по всему полю зрения, в то же время, отсутствует наличие энергетических всплесков, т.е. рассматриваемая система полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям.

Размеры пятна рассеяния для шестилинзовой оптической системы около 65мкм по обеим осям (рисунок 3 в), функция пятна рассеяния (рисунок 3 а) показывает соответствие допустимым для пятна рассеяния звёздного датчика значениям. Результаты проектирования шестилинзовой оптической системы показывают, что полученные значения функции рассеяния точки, диаметра пятна рассеяния, распределения энергии в пятне рассеяния не уступают значениям данных параметров, полученных для семилинзовой оптической системы.

Для пятилинзовой оптической системы наилучший размер пятна рассеяния около 600 мкм, что почти в 7 раз больше требуемого размера (рисунок 4 а). Кроме того в оптической системе присутствуют остаточные aberrации, которые не позволяют получить пятно рассеяния точки, соответствующее требованиям (рисунок 4 в).

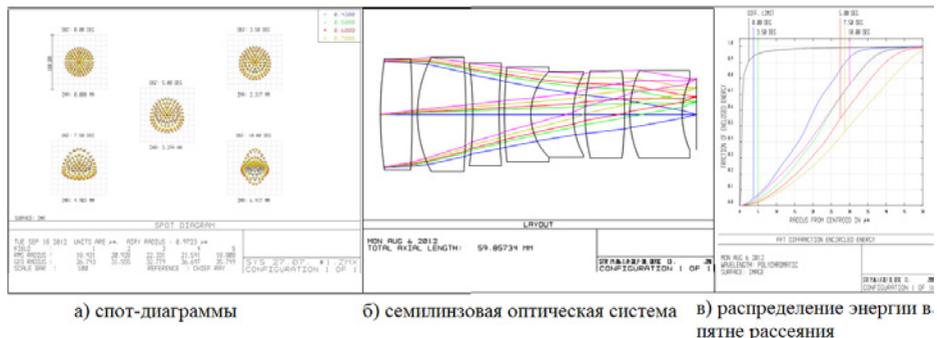


Рисунок 2 - Семилинзовая оптическая система экспериментального образца звездного датчика

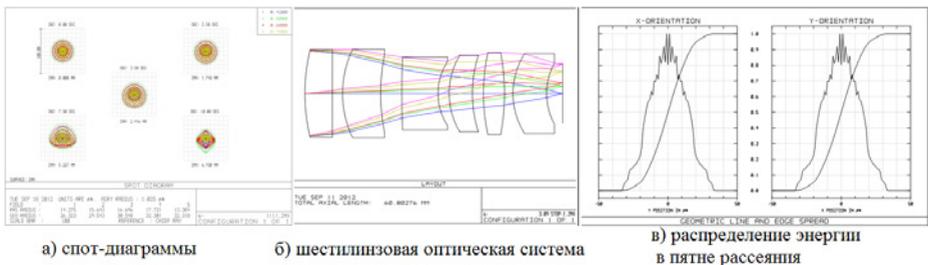


Рисунок 3 – Шестилинзовая оптическая система экспериментального образца звездного датчика

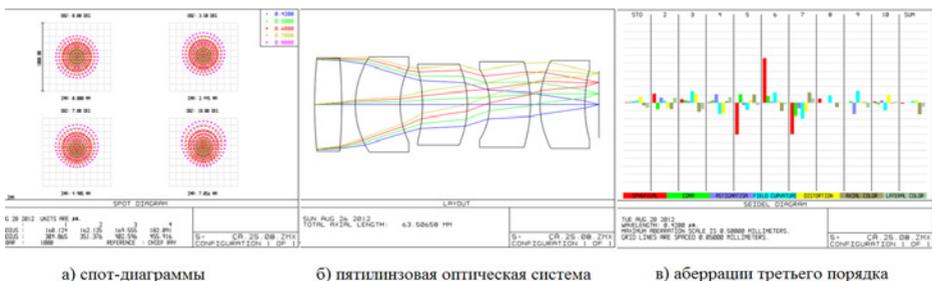


Рисунок 4 – Пятилинзовая оптическая система экспериментального образца звездного датчика

Таким образом выбор был определен в пользу шестилинзовой оптической системы, так как она позволяет компенсировать аберрации, а значения основных качественных параметров оптической системы (функция рассеяния точки, диаметр пятна рассеяния), распределение энергии в пятне рассеяния не уступают значениям данных параметров, полученных для семилинзовой оптической системы, кроме того изготовление шестилинзовой оптической системы отличается простотой в сравнении с изготовлением семилинзовой оптической системы.

Также на этапе предварительного проектирования были проведены работы по выбору бленды, детектора и оборудования блока электроники. В результате определен состав комплектующих экспериментального образца звездного датчика.

Для выбора бленды было проведено моделирование хода лучей в бленде с учетом ее конструкции и коэффициента поглощения покрытия. В результате получено количество фотонов «паразитного» излучения, достигшего выходного отверстия бленды, которое должно удовлетворять характеристикам, определенным для детектора оптической системы. В качестве детектора оптической головки разрабатываемого экспериментального образца звездного датчика рассматривается КМОП - детектор CIS2051, обладающий достаточными требованиями по чувствительности и отношению сигнал – шум.

В качестве процессорного модуля блока электроники из трех вариантов - SBC 1651, Q6, Mars ZX3 - был выбран модуль, который сочетает в себе двухядерный процессор ARM Cortex A9 и ПЛИС Artix-7. Благодаря тесной связи процессоров и ПЛИС посредством высокоскоростной шины AMBA обеспечивается гибкая настройка системы и высокая пропускная способность данных. Процессор содержит необходимый объем памяти, причем возможна прямая передача с ПЛИС в ОЗУ, что значительно увеличивает быстродействие системы.

#### 4.12.4 Детальное проектирование экспериментального образца звездного датчика

На этапе детального проектирования на основе результатов предварительного проектирования разработаны оптическая схема, чертежи конструкции объектива экспериментального образца звездного датчика (рисунок 5), состоящего из корпуса, шести линз, резьбовых и промежуточных колец, и чертежи корпуса блока электроники, позволяющие на их основе изготовить оптические и механические детали оптической системы экспериментального образца звездного датчика.

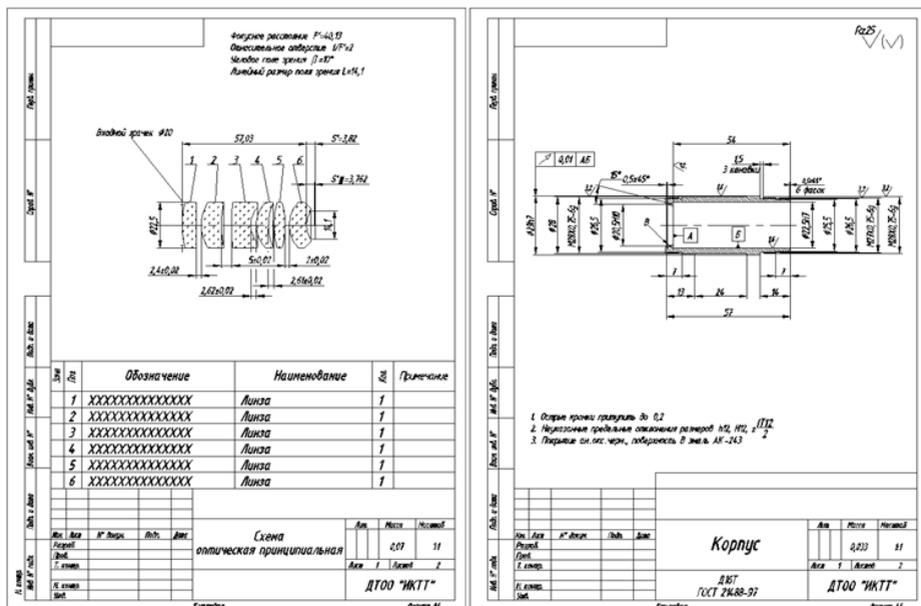


Рисунок 5 - Оптическая схема и чертеж корпуса объектива экспериментального образца звездного датчика

#### 4.12.5 Разработка оптической системы экспериментального образца звездного датчика

На текущем этапе проведены работы по изготовлению оптической системы экспериментального образца звездного датчика. Проведены подготовительные

работы, в результате которых изготовлены инструменты, приспособления и пробные стекла (рисунок 6), необходимые для контроля линз оптической системы.

В соответствии с детальным проектом изготовлены шесть линз оптической системы экспериментального образца звездного датчика (рисунок 7). В частности проведены работы по изготовлению заготовок линз и проведена обработка их исполнительных поверхностей: обдирка, шлифование и полирование.

Изготовлены механические детали оптической системы экспериментального образца звездного датчика: корпус оптической системы, промежуточные кольца, резьбовые кольца. В результате проведены работы по сборке (рисунок 8) и проверке оптической системы экспериментального образца звездного датчика.



Рисунок 6 - Пробные стекла



Рисунок 7 – Линзы



Рисунок 8 - Оптическая система экспериментального образца звездного датчика

На каждом этапе технологического процесса разработки оптических деталей проведена проверка и контроль оптической системы экспериментального образца звездного датчика. На рисунке 9 приведены результаты проверки линз методом интерференции с помощью пробных стекол. Из рисунка 9 видно, что

на освещённой поверхности оптической детали образуются приблизительно прямые интерференционные полосы с отклонением  $\sim 0.2$  полосы, следовательно, измеряемая поверхность линзы соответствует поверхности пробного стекла с достаточной точностью ( $\sim 0.025$  мкм), т.е. оптические характеристики измеряемой линзы соответствует требуемым.



Рисунок 9 – Результаты контроля линз методом интерференции с помощью пробных стекол

Таким образом, на основе проведенных работ по определению требований, разработке предварительного и детального проекта оптической системы экспериментального образца звездного датчика разработан прототип оптической системы, текущие характеристики которой удовлетворяют заданным требованиям.

### **Список литературы**

[1] *Петрухин И.И.* Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов //Сборник трудов всероссийской научно – технической конференции. – Таруса, 2008.

#### 4.13 ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ МОБИЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

*Ахмедов Д.Ш., Ерёмин Д.И.*

ДТОО «Институт космической техники и технологий» АО «НЦКИТ»

Для работы систем мониторинга необходимо круглосуточное электропитание устройств, собирающих данные с контролируемых объектов. В качестве локального источника электропитания оборудования могут выступать различные виды генераторов, основанных на применении бензиновых и дизельных двигателей внутреннего сгорания. Однако, для функционирования этих источников электроэнергии требуется горючее топливо, запас которого должен храниться в специально оборудованных помещениях, что создает дополнительные трудности.

В Институте космической техники и технологий разработана автономная подсистема энергоснабжения на базе солнечной электростанции для систем спутниковой передачи данных (АПЭССПД) [1]. Применение АПЭССПД осуществляется совместно с другими системами, использующими спутниковые системы передачи данных.

Работы по созданию систем генерирования электрической энергии посредством преобразования энергии естественных источников проводились задолго до появления первой практически применимой солнечной батареи, разработанной в 1954 году группой американских ученых. С тех пор разработки в области солнечной энергетики стали набирать темпы развития. Крупнейшие в мире компании, занятые в энергетических отраслях, вкладывают большие средства в развитие альтернативной энергетики. Основными мотивами данных действий служат следующие факторы: ограниченность запасов традиционных видов топлива, негативные экологические аспекты использования горючего топлива, возможность генерирования энергии в любой географической точке, с наиболее подходящей солнечной активностью.

Автономные солнечные энергосистемы используются для энергоснабжения объектов отдаленных от центральных энергосетей. Данный тип часто используется в том случае, если подключение к основной сети влечет слишком высокие финансовые и трудовые затраты. В этом типе солнечной энергосистемы обязательно использование аккумуляторной батареи (АКБ). Система работает по принципу генерации и накопления электроэнергии в АКБ с ее дальнейшим использованием для нужд потребителя. В зависимости от конфигурации, данный тип систем может обеспечивать потребителя постоянным либо переменным током, при использовании преобразователя (инвертора) напряжения. На рисунке 1 приведена структура автономной солнечной энергосистемы. Рассмотрим компоненты схемы. Солнечный генератор – солнечная батарея. Функции устройства отбора максимальной мощности и регулятора зарядки-разрядки в современных системах может выполнять контроллер заряда. Аккумуляторная батарея может включать в себя несколько батарей, в зависимости от того, какой

запас времени автономной работы нужно обеспечить. Инвертор преобразовывает постоянное напряжение в переменное напряжение нужной величины, например 127 или 220 В, в зависимости от напряжения питания подключаемых потребителей переменного тока. Потребители, питающиеся током постоянного напряжения, подключаются в схему перед инвертором.

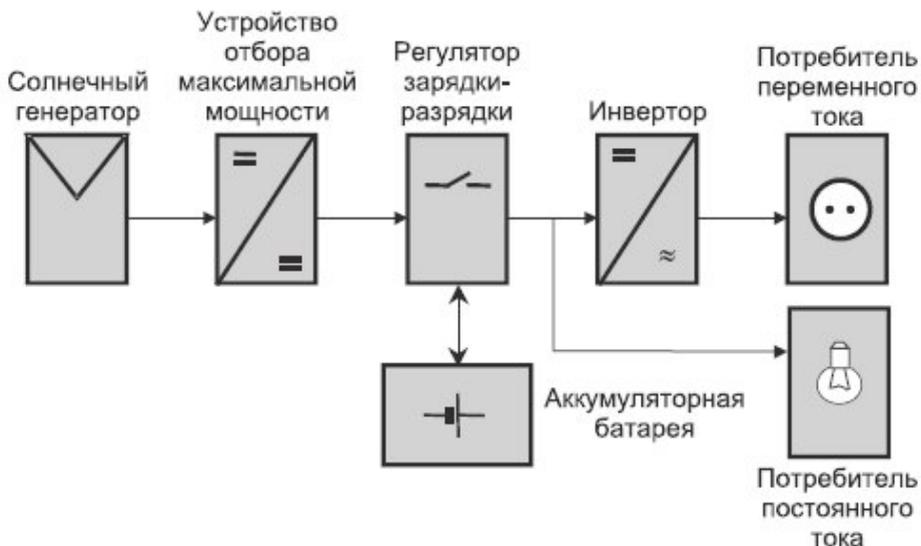


Рисунок 1 – Схема автономной солнечной энергосистемы

Рассмотрим элементы энергосистемы более подробно.

Основным элементом в данной системе по праву можно считать солнечный генератор или солнечную батарею. Солнечная батарея – комплекс фотоэлементов, объединенных между собой. Фотоэлемент (ФЭ) – прибор, преобразующий световую энергию в электрическую, действие которого основано на фотоэлектрическом эффекте [2]. Солнечная батарея – устройство, конструктивно объединяющее электрически соединенные между собой фотоэлектрические солнечные элементы и имеющие выходные клеммы для подключения внешнего потребителя.

Все фотоэлектрические элементы представлены тремя поколениями. Ключевым аспектом для всех солнечных элементов остается стоимость солнечной энергии, производимой ими, или соотношение эффективности солнечного модуля и его цены.

Первое поколение элементов – элементы на основе пластин монокристаллического или поликристаллического кремния (Mono-, multicrystalline Si). Эти элементы имеют высокую стоимость и относительно невысокую эффективность фотопреобразования в интервале от 10 до 20 процентов. Фотоэлементам этого типа принадлежит более 80 процентов рынка

земных фотоэлектрических элементов.

Второе поколение солнечных элементов – элементы на основе тонких органических (включая на красителях) или неорганических пленок. Земные элементы этого поколения имеют эффективность меньше, чем элементы первого поколения (от 5 до 15 процентов), но зато имеют гораздо меньшую стоимость благодаря незначительному расходу материалов и невысоким производственным издержкам.

Фотоэлементы третьего поколения – это устройства, обеспечивающие высокий коэффициент фотопреобразования при небольшом расходе материалов. Оно представлено квантовыми точками (фрагментами проводника или полупроводника, ограниченными по всем трём пространственным измерениям, содержащими электроны; они настолько малы, что осуществимы квантовые эффекты) и устройствами со встроенными углеродными нанотрубками. Их КПД, по мнению ученых, к моменту начала широкомасштабного производства достигнет 45 процентов. Данное поколение фотоэлектрических элементов помимо упомянутых включает еще и фотоэлектрохимические, нанокристаллические и полимерные солнечные батареи, применение которых будет осуществимо только на земной поверхности. Все представители третьего поколения пока находятся на этапе разработки или испытаний.

Для АПЭССПД выбрана солнечная батарея, состоящая из фотоэлементов первого поколения, так как в данное время наибольшее распространение в производстве получили моно- и поликристаллические солнечные батареи.



Рисунок 2 – Солнечная батарея АПЭССПД

Аккумуляторная батарея – группа соединенных источников электрического тока. В аккумуляторе накапливается энергия, выработанная солнечным модулем.

В качестве компонента солнечной энергетической установки, аккумуляторная батарея (АКБ) выполняет три задачи:

- покрывает пиковую нагрузку, которую не могут покрыть сами фотоэлектрические модули (резервный запас);
- дает энергию в ночное время (кратковременное хранение);
- компенсирует периоды плохой погоды или слишком высокого энергопотребления (среднесрочное хранение).

Избыток электроэнергии, вырабатываемый источником, может запасаться в АКБ на длительное время (десятки дней и даже месяцы), а запасенная электроэнергия в любой момент может быть передана в нагрузку, при этом разрядный ток может многократно превышать ток заряда и обеспечивать питание нагрузки, мощность которой многократно превышает установленную мощность солнечной батареи.

В результате рассмотрения основных эксплуатационных характеристик АКБ различных типов (NiCd, NiMH, Li-Ion, свинцово-кислотные и т.д.), сравнения и сопоставления их с требованиями к АКБ для солнечной энергосистемы, был выбран оптимальный вариант – свинцово-кислотная батарея (рисунок 3). Свинцово-кислотные аккумуляторные батареи до сих пор остаются самыми надежными, долговечными и не требующими высоких эксплуатационных затрат химическими источниками тока.



Рисунок 3 – Аккумуляторная батарея АПЭССПД

Контроллеры заряда используются в автономных фотоэлектрических системах для защиты АКБ от глубокого разряда (когда есть перерасход энергии) или перезаряда (когда батарея заряжена, а солнечная панель вырабатывает избыток электричества).

Для АПЭССПД был разработан собственный контроллер, реализующий метод заряда с функцией слежения за точкой максимальной мощности (рисунок 4), построенный на базе специализированного микроконтроллера МРТ-612 производства NXP.

Микроконтроллер МРТ-612 предназначен для выполнения функции отслеживания точки максимальной мощности для устройств на основе солнечных или топливных элементов. Благодаря реализованному в микросхеме алгоритму МРРТ, МРТ612 обеспечивает эффективность извлечения энергии до 98 процентов в таких решениях, как контроллеры заряда солнечных батарей, устройства распределенного слежения за точкой максимальной мощности и микроинверторы.

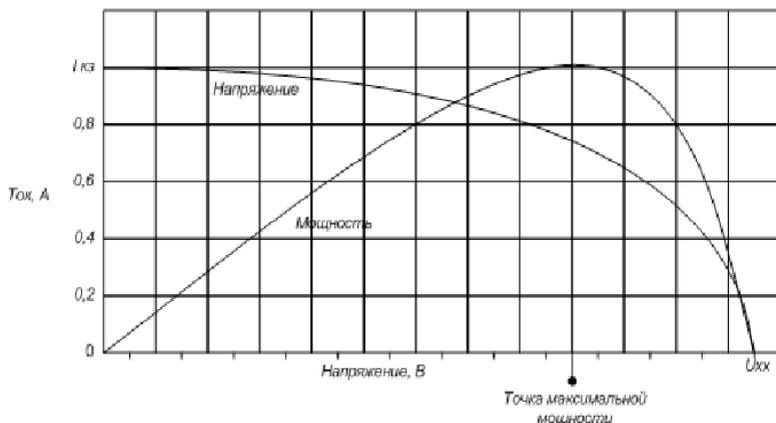


Рисунок 4 – Точка максимальной мощности солнечной батареи

Микросхема МРТ612 от компании NXP легко настраивается для работы с разнообразными устройствами, использующими контроллеры солнечного заряда с отслеживанием точки максимальной мощности (рисунок 5).

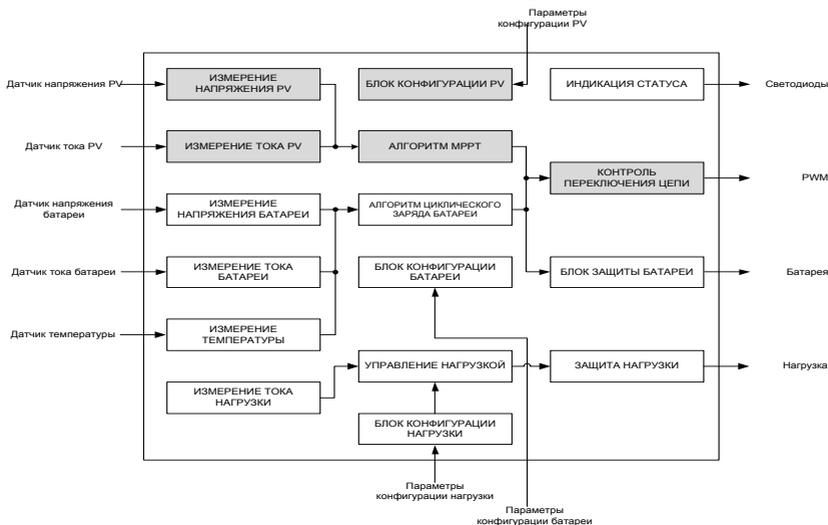


Рисунок 5 – Функциональная схема МРТ-612

Гибкое решение MPT612 от компании NXP построено на базе 32-битного процессора ARM7TDMI-S™ малой мощности, который поддерживает несколько последовательных интерфейсов, включая I2C, UART, SPI и SSP. Микросхема MPT612 имеет аппаратные функции, необходимые для фотоэлектрических приложений, включая функции измерения напряжения и силы тока, а также настройки параметров панелей, и способна отправлять исходящий сигнал для контроля внешних переключений. Микросхема MPT612 имеет флэш-память до 15 кБ для хранения программных приложений, а также обеспечивает три уровня защиты флэш-памяти от считывания кода (CRP) для защиты разработанного пользователем программного кода.

Были проведены ряд экспериментов с выбранной солнечной батареей при работе с различной нагрузкой. В таблице 1 представлены исходные данные экспериментов.

Условия проведения	Номер эксперимента		
	1	2	3
Дата	24.09.2012	25.09.2012	26.09.2012
Время дня	15:30	14:00	17:00
Температура, °C	плюс 15	плюс 17	плюс 15
Погода	ясная	ясная	облачно

Таблица 1 – Условия проведения экспериментов

По результатам проведенных экспериментов 1, 2 и 3 построены графики (рисунок 6, 7 и 8 соответственно).

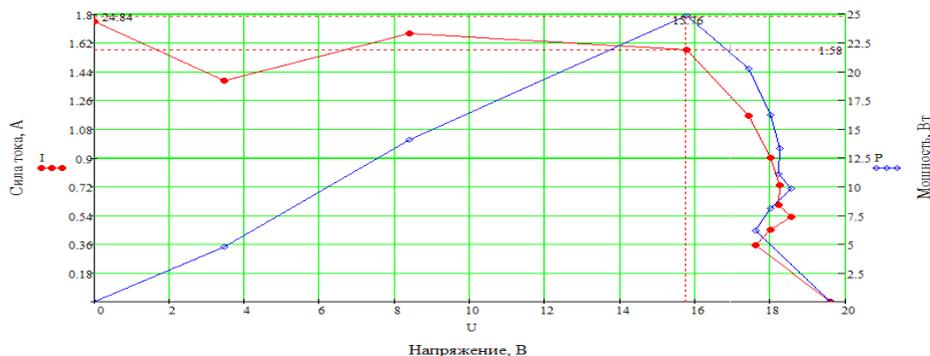


Рисунок 6 – Результаты эксперимента 1

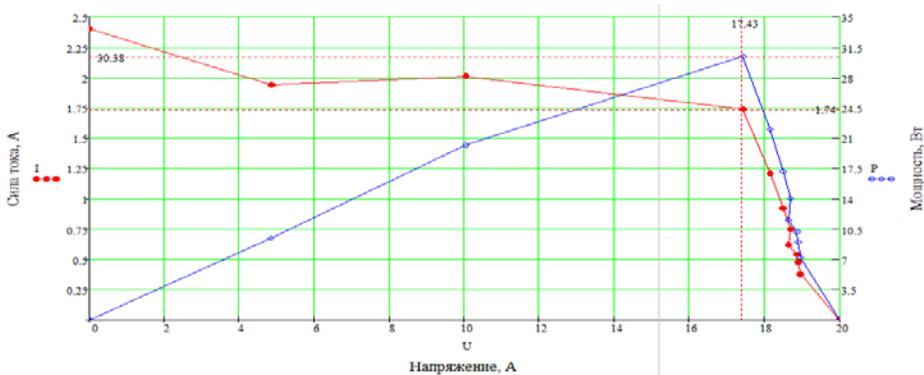


Рисунок 7 – Результаты эксперимента 2

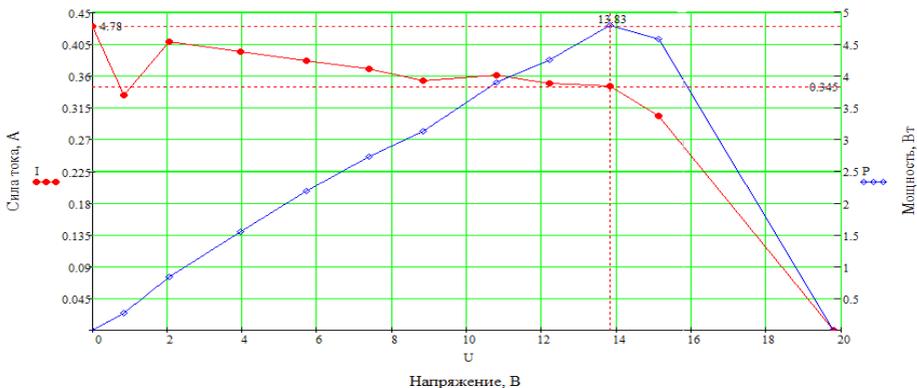


Рисунок 8 – Результаты эксперимента 3

Как видно из результатов экспериментов, точка максимальной мощности данной солнечной батареи составила 17,43 В. Полученное значение близко к заявленному изготовителем (17,6 В). Данные результаты были достигнуты в условиях эксперимента 2.

Результаты эксперимента 3 подтверждают, что вырабатываемая солнечной батареей мощность сильно зависит от облачности и, соответственно, количества солнечной энергии, приходящейся на единицу площади поверхности солнечной батареи. Соответственно, АПЭССПД будет наиболее интенсивно заряжать АКБ в ясную безоблачную погоду.

На рисунке 9 показан график изменения напряжения на выходе контроллера заряда аккумуляторной батареи в солнечный день.

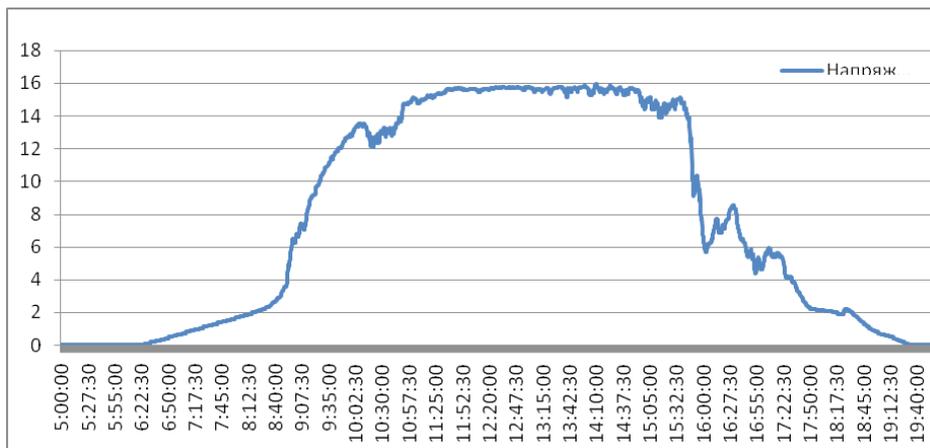


Рисунок 9 – Напряжение на выходе контроллера заряда.

Из графика видно, что система способна производить наиболее эффективный заряд в промежутке с 10:00 до 16:00, когда выходное напряжение больше 12 В, что является обязательным условием для осуществления заряда аккумулятора спутникового терминала.

Были проведены долгосрочные испытания, которые показали, что разработанная автономная подсистема энергоснабжения на базе солнечной электростанции для систем спутниковой передачи данных осуществляет электропитание спутникового терминала и подзарядку аккумуляторной батареи, что обеспечивает полностью автономную работу терминала.

### Список литературы

[1] Отчет о НИР (промежуточный). Часть 1. «Разработка автономных подсистем энергоснабжения для систем спутниковой передачи данных».

[2] Чечик Н.О. Фотоэлементы и их применение / Под ред. Жигарева А.А. – М.: Госэнергоиздат, 1955 – С. 3.

## **4.14 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ**

*Елубаев С.А., Джамалов Н.К., Алипбаев К.А., Сухенко А.С.,  
Бонеев Т.М., Шамро А.В.*

ДТОО «Институт космической техники и технологий» АО «НЦКИТ»

### **4.14.1 Введение**

Космический аппарат (КА) является довольно сложной технической системой. Особенно важной и сложной системой КА является его система ориентации, поскольку от ее работы во многом зависит качество работы всех остальных подсистем и полезной нагрузки. Поэтому перед запуском КА его система ориентации, как и другие системы КА, должна подвергаться многоэтапным, многосторонним и тщательным проверкам и испытаниям. При этом большую роль играет математическое и имитационное моделирование, но очень важно на первых этапах проверить их работу, реализуемость и эффективность на практике для конкретной аппаратной реализации. Для этого требуются наземные испытательные стенды [1].

Испытания на стендах дают важную информацию о будущем поведении КА на орбите, позволяют выявить ошибки, допущенные при его разработке и изготовлении, помогают найти границы применимости того или иного метода управления и многое другое, на основе чего можно надеяться на четкую и надежную работу спутника на орбите [2]. В источниках [1-10] приведены подробные сведения о различных стендах, позволяющих в наземных условиях проводить натурные исследования различных служебных систем КА. В Институте космической техники и технологии Национального центра космических исследований и технологий создан лабораторный стенд «Система ориентации микроспутника», предназначенный для демонстрации принципа работы исполнительного органа системы ориентации микроспутников - маховика, а также лабораторный стенд «Прототип солнечного датчика», предназначенный для отработки основных алгоритмов программно-математического обеспечения обработки и распознавания изображения для оптических солнечных датчиков (СД).

### **4.14.2 Лабораторный стенд системы ориентации микроспутника**

Общий вид стенда показан на рисунке 1. Стенд представляет собой механическую конструкцию в виде установленной на штативе одноосной подвижной платформы, на которой установлены исполнительный орган (маховик с двигателем постоянного тока), датчик ориентации (одноосный гироскопический датчик угловой скорости, выполненный по МЭМС-технологии), модуль беспроводной связи, модуль питания (аккумуляторные батареи), модуль управления (логическое устройство), а также система противовесов для

статической балансировки подвижной платформы.

Основным назначением лабораторного стенда является демонстрация принципа работы исполнительного органа системы ориентации микроспутников – маховика. Работа маховика заключается в создании управляющего момента, действующего на подвижную платформу путем изменения скорости вращения маховика.

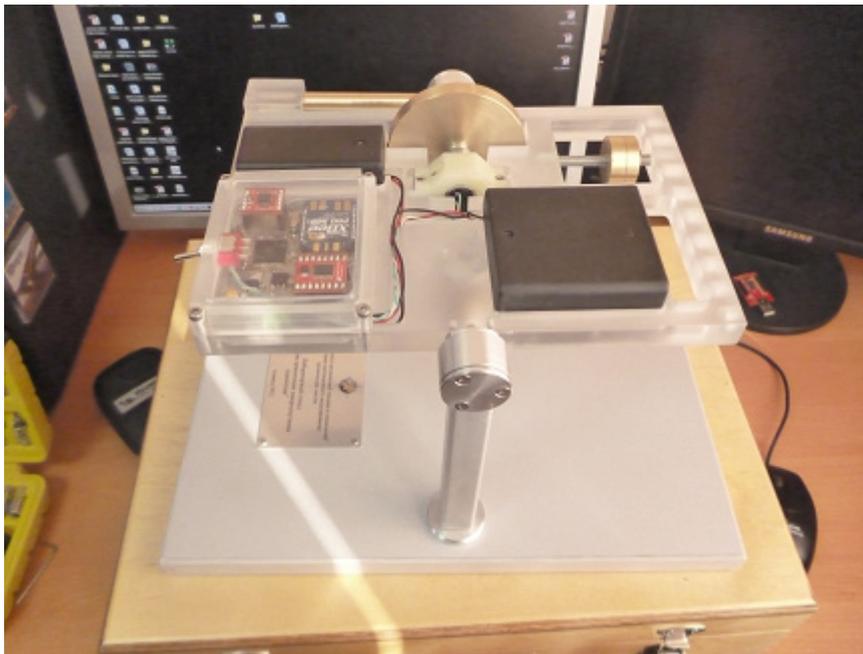


Рисунок 1 – Общий вид стенда

Рассмотрим структурную схему системы управления лабораторного стенда, приведенную на рисунке 2.

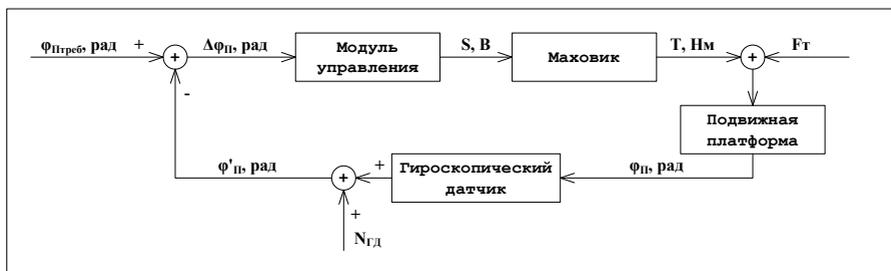


Рисунок 2 – Структурная схема системы управления лабораторного стенда

Как видно из приведенного рисунка, управление подвижной платформой происходит по замкнутому контуру, где в качестве управляющего устройства рассматривается модуль управления, исполнительным органом является маховик, объектом управления выступает подвижная платформа, а устройством обратной связи является гироскопический датчик. Модуль управления сравнивает требуемое угловое положение подвижной платформы  $\varphi_{\text{Треб}}$  с измерениями гироскопического датчика  $\varphi'_{\text{П}}$  и определяет рассогласование (ошибку управления)  $\Delta\varphi_{\text{П}}$  - разницу между заданным и измеренным угловым положением подвижной платформы. Если оно равно нулю, управление не требуется. Если разница есть, модуль управления выдает управляющий сигнал, который стремится свести рассогласование к нулю. Создана программная система для управления работой лабораторного стенда и визуализации полученных результатов, интерфейс которой показан на рисунке 3. Программная система позволяет вводить угловое положение подвижной платформы, рассчитывать управляющие моменты и передавать управляющие сигналы исполнительному органу – маховику, визуализировать полученные результаты.

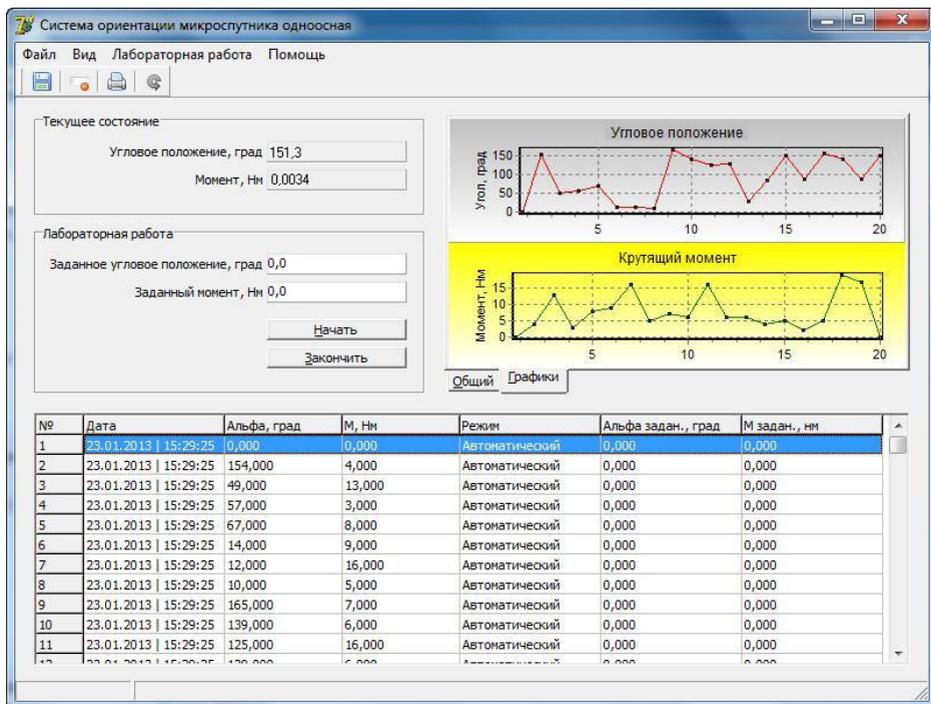


Рисунок 3 – Интерфейс программной системы

#### 4.14.3 Лабораторный стенд «прототип солнечного датчика»

Общий вид стенда показан на рисунке 4. Стенд состоит из веб-камеры – прототипа солнечного датчика и источника света, размещенных на горизонтальном рычаге, имеющего возможность вращаться вокруг вертикальной оси. С помощью лабораторного стенда можно определить наличие источника света в поле зрения детектора и ориентировать веб-камеру на источник света с помощью двигателя. На рисунке 5 представлен общий принцип работы лабораторного стенда.



Рисунок 4 – Общий вид лабораторного стенда

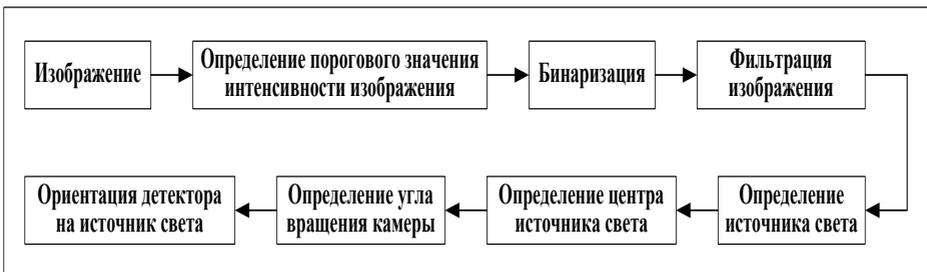


Рисунок 5 – Схема определения источника света на изображении

Выбор соответствующего значения пороговой величины дает возможность

выделения на изображении областей определенного вида. Операция порогового разделения является одной из наиболее простых и важных процедур поэлементных преобразований и почти всегда предшествует процессу анализа и распознавания изображений.

Следующим шагом в распознавании изображения является его бинаризация. Существует множество методов бинаризации. Рассмотрим наиболее простой из них, а именно метод бинаризации с нижним порогом, в котором используется только одно значение порога, и который может быть реализован согласно правилу:

$$I_{\text{изобр}}(x, y) = \begin{cases} 0, & I_{\text{изобр}}(x, y) \leq t, \\ 1, & I_{\text{изобр}}(x, y) > t, \end{cases} \quad (1)$$

где  $t$  - порог бинаризации.

Для определения источника света представим изображение в виде функции:

$$I_{\dot{e}} = I_{\text{изобр}}(x, y), \quad (2)$$

где  $I_{\dot{e}}$  - интенсивность элемента изображения.

Допустимая площадь изображения объекта вычисляется экспериментально путём подсчёта числа пикселей. Полученная площадь будет использована для определения положения источника света.

Координаты геометрического центра изображения источника света  $x_{\dot{e}n\dot{o}}^{\ddot{o}}, y_{\dot{e}n\dot{o}}^{\ddot{o}}$  можно определить по формулам (рисунок 6):

$$x_{\text{ист}}^{\ddot{u}} = \frac{\sum_{x=0}^m \sum_{y=0}^n x_{\text{изобр}} I_{\text{изобр}}(x, y)}{A}, \quad y_{\text{ист}}^{\ddot{u}} = \frac{\sum_{x=0}^m \sum_{y=0}^n y_{\text{изобр}} I_{\text{изобр}}(x, y)}{A}, \quad (3)$$

где  $x_{\text{изобр}}, y_{\text{изобр}}$  - номера строк и столбцов всех пикселей  $I_{\text{изобр}}(x, y)$ , входящих в объект,  $A$  - допустимая площадь изображения.

Зная координаты центра области изображения  $x_{\text{ист}}^{\ddot{u}}, y_{\text{ист}}^{\ddot{u}}$  и угловые расстояния до граничных элементов изображения, можно определить угловое отклонение

$\alpha_{\text{ист}}, \beta_{\text{ист}}$  направления на источник света от осей прибора (рисунок 7):

$$\alpha_{\text{ист}} = \arctg\left(\frac{x_{\text{ист}}^{\ddot{u}} - w_{\text{обц}}/2}{w_{\text{обц}}/2} \text{tg}(\alpha_{\text{обз}})\right), \quad \beta_{\text{ист}} = \arctg\left(\frac{y_{\text{ист}}^{\ddot{u}} - h_{\text{обц}}/2}{h_{\text{обц}}/2} \text{tg}(\beta_{\text{обз}})\right), \quad (4)$$

где  $\alpha_{\text{обз}}, \beta_{\text{обз}}$  - горизонтальный и вертикальный углы обзора прибора,  $w_{\text{обц}}, h_{\text{обц}}$  - ширина и высота изображения в пикселях.

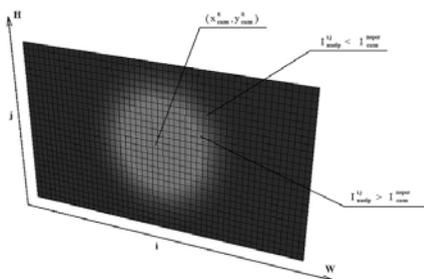


Рисунок 6 - Определение контура и центра источника света на изображении

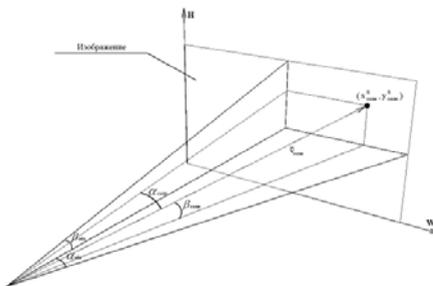


Рисунок 7 - Определение углового отклонения вектора направления на источник света относительно осей прототипа солнечного датчика

Разработана программная система, позволяющая выделять источник света на изображении, полученном с веб-камеры. На рисунке 8 показано исходное цветное изображение, снятое с помощью детектора веб-камеры. Для определения белых пятен (источника цвета) на изображении должна быть проведена бинаризация изображения. Перед бинаризацией изображения на первом этапе из исходного цветного изображения получено черно – белое изображение, которое показано на рисунке 9.

Для определения порогового значения для бинаризации по черно-белому изображению построена гистограмма, которая показана на рисунке 10. Из анализа построенной гистограммы определено, что пороговое значение для выделения белых пятен должно лежать в диапазоне от 169 и до 225.

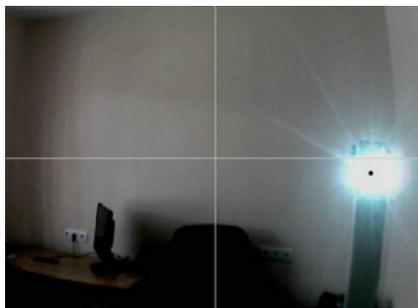


Рисунок 8 – Исходное изображение

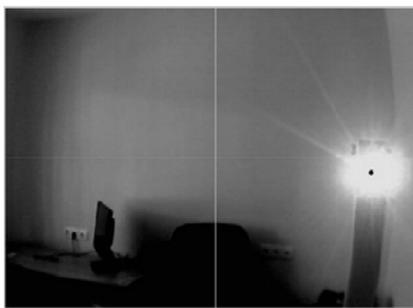


Рисунок 9 – Черно-белое изображение

Далее проведены численные эксперименты по бинаризации изображения при различных пороговых значениях. На рисунках 11 - 13 показаны результаты бинаризации при порогах 169, 220 и 225 соответственно. Из рисунка 11 видно, что при значении порога 169 на изображении остались лишние пятна. При значении

порога 220 (рисунок 12) эти пятна исчезли, осталось только изображение источника света, а при значении порога 225 (рисунок 13) изображение источника света почти исчезло, что не позволяет определить его положение в кадре. Таким образом, оптимальное значение порогового значения бинаризации должно лежать в пределах 220.

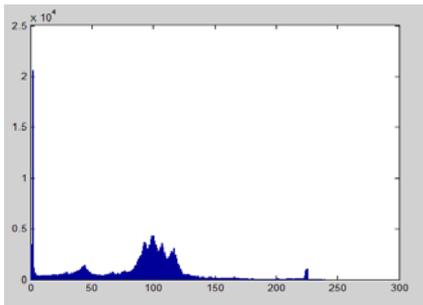


Рисунок 10 – Гистограмма черно-белого изображения



Рисунок 11 – Бинаризация черно-белого изображения при пороге 169

Разработана программная система определения относительного углового положения между оптической осью веб-камеры и направлением на центр изображения источника света и ориентации веб-камеры на источник света. На рисунке 14 показан результат одного из численных расчетов по ориентации веб-камеры на источник света, полученный с помощью программной системы. Видно, что после бинаризации определен центр изображения источника света. Далее программа определяет относительное угловое положение между оптической осью веб-камеры и центром изображения источника света и выдает команды приводам веб-камеры для совмещения ее оптической оси с направлением на центр изображения источника света.



Рисунок 12 – Бинаризация черно-белого изображения при пороге 220

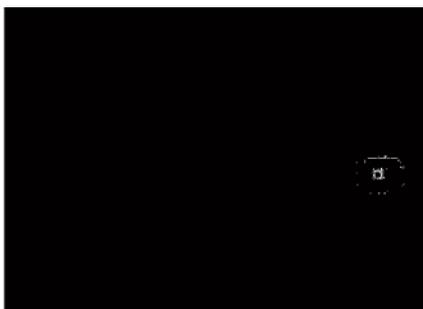


Рисунок 13 – Бинаризация черно-белого изображения при пороге 225

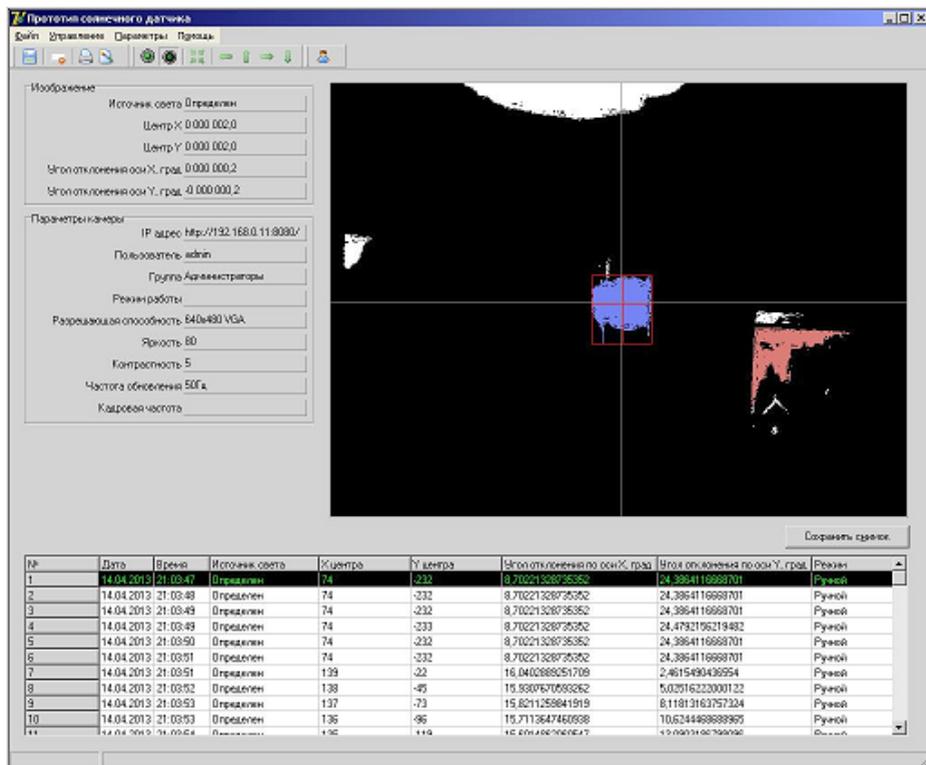


Рисунок 14 – Результаты выделения изображения источника света

## Заключение

Разработан лабораторный стенд «Система ориентации микроспутника», который позволяет демонстрировать работу компонентов системы ориентации микроспутника и выполняет следующие функции: одноосная ориентация в автоматическом режиме, одноосная ориентации в ручном режиме, визуализация текущего углового положения, угловой скорости и управляющего момента, которые позволяют проводить исследование режимов работы системы ориентации.

Разработан лабораторный стенд «Прототип солнечного датчика», который позволяет студентам получить навыки определения углового положения космического аппарата относительно внешних ориентиров (Солнце) при изучении дисциплин, связанных с системами управления космического аппарата.

Таким образом, разработанные лабораторные стенды дают понятия об общих принципах работы систем ориентации космических аппаратов, и могут быть использованы в качестве наглядного пособия для лекционных занятий, также для выполнения студентами лабораторных работ.

## Список литературы

- [1] Карпенко С.О., Овчинников М.Ю. Лабораторный стенд для полунатурной отработки систем ориентации микро- и наноспутников. - Москва, 2008.
- [2] Иванов Д.С., Вальтер Т., Биндель Д., Овчинников М.Ю. Стенд для отработки алгоритмов управления движением многоэлементных систем. // Препринты ИПМ им. Келдыша М.В. 2008. № 56. 32 с.
- [3] Биндель Д., Иванов Д.С., Нуждин Д.О., Овчинников М.Ю., Трофимов С.П. Система определения положения и ориентации макета спутника на основе блока инерциальных датчиков и звездного датчика // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011. № 24. 30 с.
- [4] Дегтярев А.А., Ткачев С.С., Мыльников Д.А. Лабораторный стенд для отработки макета звездного датчика ориентации малых спутников // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010. № 67. 31 с.
- [5] Иванов Д.С., Овчинников М.Ю., Трофимов С.П. Применение фотограмметрического метода в задаче автономного определения относительного движения группы макетов // Препринты ИПМ им. Келдыша М.В. 2010. № 5. 22 с.
- [6] Иванов Д.С., Карпенко С.О., Овчинников М.Ю., Ролдугин Д.С., Ткачев С.С. Лабораторные испытания алгоритмов управления ориентацией микроспутника 'Чибиc-М// Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011. № 40. 29 с.
- [7] Мирер С.А., Прилепский И.В. Моделирование динамики макета малого спутника на лабораторном стенде // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2009. № 41. 28 с.
- [8] Овчинников М.Ю., Ткачёв С.С. Компьютерное и полунатурное моделирование динамики управляемых систем // ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. Москва, 2008.
- [9] Овчинников М.Ю., Середницкий А.С., Овчинников А.М. Лабораторный стенд для отработки алгоритмов определения движения микроспутника по снимкам звездного неба. // ИПМ им. Келдыша М.В. РАН.- Москва, 2006
- [10] Полилов Е.В., Батрак А.М., Руднев Е.С., Скорик С.П., Горелов П.В. Исследовательский стенд для апробации алгоритмов управления сложными электромеханическими системами. Донбасский государственный технический университет
- [11] Маркелов А.П. теоретическая механика: Учебник для университетов. – Москва:ЧеРо, 1999, 572 стр.
- [12] Овчинников И.Е., Лагун А.В. Динамика системы ориентации космического летательного аппарата с двигателями-маховикам/ Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2009, № 5(63). С. 48-54.

## **Список используемых сокращений**

GPS- global position system(глобальная позиционная система)

HDF- hierehical data format(иерархический формат данных)

ДЗЗ- дистанционное зондирование земли

СДЗП- современное движение земных поверхностей

ПС- протонные события

КА- космический аппарат

ДИ- дифференциальная интерферометрия

ЦМР- цифровая модель рельефа

МТ- магистральный трубопровод

ТРП- терморегулирующиеся покрытия

ЧС- чрезвычайная ситуация

ГИС- геоинформационная система

**Наземно-космические технологии в исследованиях Земли**  
Алматы: ТОО «А-ТРИ ПРИНТ», 2013. Том 11 — 276 с.

**ISBN 978-601-80431-1-6**

**Н 19**

В коллективной монографии представлены наиболее значимые результаты НИР, полученные коллективом ученых и специалистов АО «НЦКИТ» в 2012-2013 годы в рамках республиканской бюджетной программы 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности». Коллективная монография состоит из четырех разделов «Исследования геодинамики наземно-космическими методами», «Исследование динамических процессов атмосферы и солнечно-земных связей на основе наземно-космических измерений», «Космические технологии в исследованиях экологии Казахстана», «Развитие космических технологий».

Книга рассчитана на ученых и специалистов, работающих в сфере астрофизических и космических исследований, а также на преподавателей, магистрантов и студентов вузов, интересующихся новейшими достижениями космической науки.

**УДК 550.3**  
**ББК 22.63**

© АО «Национальный центр космических исследований и технологий», 2013

© ДТОО «Институт ионосферы», 2013

© ТОО «А-ТРИ ПРИНТ», оформление, 2013

**ISBN 978-601-80431-1-6**

# Наземно-космические технологии в исследованиях Земли

Дизайнер: *Яхия А.*  
Компьютерная верстка: *Яхия А.*

Подписано в печать 18.12.13  
Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Уч. изд. печ. л. 18.5  
Тираж 100 экз.

Издательство: «А-Три Принт»  
г.Алматы, ул. Макатаева 117  
Тел: 328 34 88  
Типография: «А-Три Принт»  
г.Алматы, ул. Макатаева 117  
Тел: 328 34 88