

УДК 551.501: 629.195.1

Доктор техн. наук
Канд. техн. наук

А.Х. Ахмеджанов¹
Т.К. Караданов¹
Н.А. Кенжебеков¹

ТЕХНОЛОГИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Ключевые слова: мониторинг, атмосфера, содержание, парниковые газы, технология, климат, информационная система

Рассмотрены вопросы построения информационной системы регионального космического мониторинга парниковых газов в атмосфере над территорией Казахстана. Предлагается информационная технология для ведения регионального космического мониторинга парниковых газов в атмосфере. Описывается состав, структура и взаимосвязь параметров информационной системы. Выполнено описание работы информационной системы регионального космического мониторинга парниковых газов в атмосфере. Представлены основные результаты исследования динамики содержания метана в атмосфере Казахстана.

Введение. В связи с изменением климата и необходимостью глобального контроля за повышением содержания парниковых газов в атмосфере Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) инициировала разработку Интегрированной глобальной информационной системы по парниковым газам (ИГИС ПГ) в июне 2016 г., чтобы помочь направлять важные мероприятия по сокращению выбросов ПГ в условиях изменения климата.

Новая система будет способствовать обеспечению деятельности по смягчению воздействий на изменение климата. Работы по осуществлению ИГИС ПГ ведутся после одобрения концептуального документа

¹АО "Национальный центр космических исследований и технологий", г. Алматы, Казахстан

Исполнительным советом ВМО [3] в июне 2016 г. Система основывается на данных дистанционного зондирования Земли.

Методы дистанционного зондирования позволяют оперативно проводить анализ изменений, происходящих в атмосфере во времени и пространстве, выявлять техногенные аварии и катастрофы. Описание всех основных отечественных и зарубежных оперативных космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с анализом информационных возможностей бортовых датчиков, характеристик, используемых в космических аппаратах, а также особенностей построения и функционирования систем приема, обработки и распространения спутниковой информации представлены в [1].

Служба мониторинга атмосферы Коперника (CAMS) [7] предоставляет согласованную и контролируемую информацию, связанную с загрязнением воздуха и состоянием здоровья, солнечной энергией, парниковыми газами и воздействием климата, солнечной энергией, парниковыми газами и их воздействием на климат. Прибор TROPospheric Monitoring (TROPOMI) является спутниковым прибором на борту спутника Copernicus Sentinel-5. Sentinel-5 Precursor (S5P) – первый из состава атмосферы Sentinels, запущенный 13 октября 2017 года, запланированный на семилетнюю миссию. TROPOMI определял и картировал углекислый газ, метан, окись углерода, оксид азота и аэрозоли. Изменение сценария операций Copernicus Sentinel 5P с увеличенным пространственным разрешением с 7,2 км до 5,6 км вдоль трассы для всех измерений было проведено и действует с 6 августа 2019 года.

Система анализа данных NASA Giovanni [4] была признана полезным инструментом для доступа и анализа множества различных типов данных дистанционного зондирования. Giovanni, онлайн-инструмент визуализации и анализа NASA Goddard, позволяет пользователям исследовать различные атмосферные явления, не изучая форматы данных дистанционного зондирования и не загружая объемные данные. Спутник наблюдений за парниковыми газами GOSat, также известный как Ibuki [5], предназначен для мониторинга парниковых газов. Он был разработан Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA) и запущен 23 января 2009 года из Космического центра Танегасима. Глобальный атмосферный реанализ спутниковых данных осуществляет система MERRA-2 [6] на уровне глобального управления, моделирования и ассимиляции спутниковых данных. Цели этой системы

закключаются в обеспечении учета параметров глобальной атмосферы и аспектов климатической системы, включая газовые компоненты и улучшенное представление поверхности Земли. MERRA-2 является одной из первых глобальных систем реанализа спутниковых данных для ассимиляции космических наблюдений газов и аэрозолей, и представления их взаимодействия с другими физическими процессами в климатической системе.

Структурно спутниковая система мониторинга (рис. 1) включает: орбитальный и наземный сегменты, которые осуществляют функции наблюдения; информационные технологии, позволяющие проводить обработку и визуализацию спутниковых данных; математического моделирования для получения недостающих параметров; оценки фактического и прогнозного содержания парниковых газов.

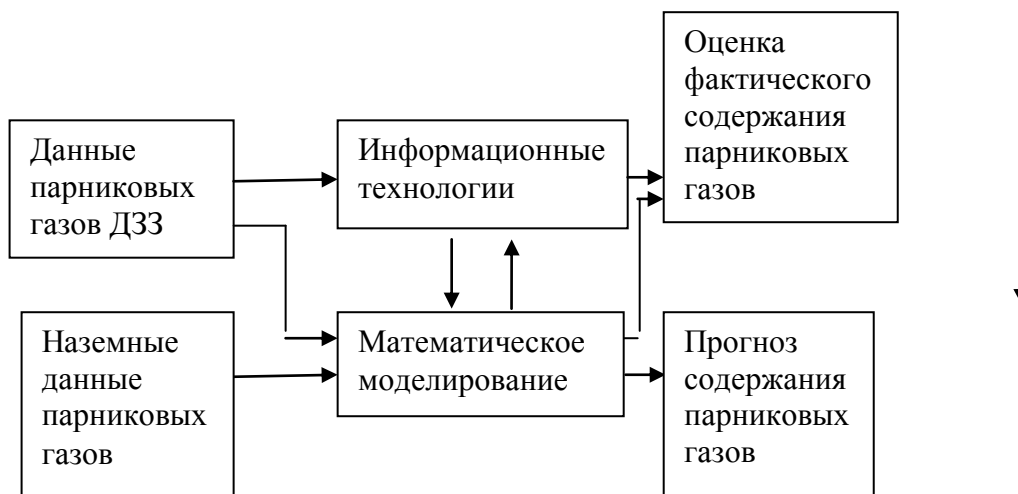


Рис. 1. Структура космического мониторинга парниковых газов.

Накопление спутниковых данных парниковых газов происходит в базе TIGR, информационной системе BADC. На спутнике Aura (NASA, США) находятся сенсоры TES, MLS и др., на спутнике AQUA (NASA, США) – AIRS и MODIS, на спутнике ENVISAT (ESA) – SCIAMACHY, на спутнике METOP-A (ESA) – IASI, на спутнике GOSAT (JAXA, Япония) – TANSO-FTS. 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 в инфракрасном диапазоне в тропосферных слоях атмосферы, восстанавливаются вертикальные профили CH_4 , O_3 и др., доступные на сайте GIOVANNI за период 2004...2010 годы.

Прибор AIRS на спутнике Aura представляет собой многоканальный дифракционный спектрометр, позволяющий получать информацию о профилях температуры и влажности воздуха, концентрации различных газов. Спектрометр TES измеряет уходящее ИК тепловое излучение ($650...3050 \text{ см}^{-1}$). Высокое спектральное разрешение измерений регистрирует содержание газовых компонент атмосферы. Прибор HIRDLS (High Resolution Dynamics Limb Sounder) – это радиометр (спектральные каналы в области от 6 до 17 мкм). Этот прибор позволяет получать профили температуры, содержания различных парниковых газов. Спектрометр MLS (Microwave Limb Sounder) проводит спектральные микроволновые измерения излучения горизонта Земли, позволяет определять профили температуры воздуха и содержание парниковых газов на различных высотах.

На японском спутнике GOSAT функционируют два прибора: интерферометр TANSO-FTS и видеоприбор TANSO-CAI (Thermal And Nearinfrared Sensor for carbon Observations – Cloud and Aerosol Imager). Эти приборы измеряют содержание углекислого газа, метана, водяного пара и других газов в отдельных точках земной поверхности. В системе национальной гидрометеорологической службы наблюдения за состоянием окружающей среды проводится мониторинг состояния окружающей среды в соответствии с Экологическим Кодексом Республики Казахстан, включающим в себя наблюдения за загрязнением наземного атмосферного воздуха во всех крупных населенных пунктах. Выпущены информационные бюллетени о состоянии окружающей среды за 2017 и 2019 годы с данными измерений загрязняющих веществ в атмосфере во всех городах Республики Казахстан [2].

В блоке информационные технологии были использованы программные средства полного цикла, а также узкоспециализированные, с последующей разработкой операций взаимодействия между ними. Было применено программное обеспечение ArcGIS Server. Серверное программное обеспечение (ПО) обеспечивает первичную обработку пользовательских запросов, обеспечивая пользователя взаимосвязью с данными и ПО для работы с пространственными данными (Windows, IIS,

NETCore, C#). Серверное ПО разработано в виде веб-приложения с использованием фреймворка .NETCore на языке программирования C#. СУБД (PostgreSQL) служит для хранения данных (в том числе пространственных), обеспечения доступа к ним. Сервер ПО для работы с пространственными данными (GeoServer) обеспечивает предварительную конвертацию этих данных.

При выборе итогового набора инструментов разработки, отдельное внимание было уделено поддержке ими формата Open Geospatial Consortium (OGC) – WebMapService (WMS). WMS – это протокол передачи (интерфейс) пространственных данных. Задача данного интерфейса – это предоставление конечным пользователям (или разработчикам) унифицированного доступа к пространственным данным. На базе инструментов OSGeo было создано геоинформационное веб-приложение.

В сегменте математического моделирования представлены реализация задач дистанционного зондирования параметров с ИСЗ в диапазоне инфракрасного излучения. Одной из задач является восстановление вертикального профиля содержания парникового газа в атмосфере. Измеряемое спутниками тепловое излучение есть сумма всех излучений элементарных слоев атмосферы. Каждый слой характеризуется функцией ослабления теплового излучения, которая зависит от вертикального профиля малых газов, давления и температуры воздуха, угла визирования, а также от длины волны. Уходящее излучение земли генерируется в различных слоях земной атмосферы и тем самым отражает плотностный режим этих слоев или их концентрацию в них. Такое положение может быть физическим обоснованием представления искомым функций в виде ряда. Значения коэффициента поглощения конкретного газа могут быть получены из базы данных HITRAN, которая содержит спектроскопические данные о молекулярном поглощении газов, в том числе коэффициент поглощения излучения газа в атмосфере. Вычисление спектральных профилей линий молекул газа основано на линейном методе, который суммирует стандартные формы линий отдельных линий поглощения. Общий коэффициент молекулярного поглощения в атмосфере представляет собой, в первом приближении, сумму коэффициентов поглощения в отдельных линиях поглощения атмосферного газа.

Важной задачей является определение значений содержания парниковых газов на уровне земной поверхности. Это важно, применительно к неоднородному рельефу Казахстана, поскольку имеющиеся спутниковые данные представлены в изобарической системе координат. Нижнее значение в этой системе, 1000 гПа, соответствует уровню моря, а рельеф Казахстана очень разнообразен от Прикаспийской низменности на западе, Казахского мелкосопочника в центре, до гор на юго-востоке. На основе топографии и температурного режима на момент расчета пересчитывается поле давления, затем значение содержания парникового газа определяется в расчетной точке на местности.

Система космического мониторинга парниковых газов. Система (рис. 2) обеспечивает быстрое и простое интерактивное средство для научных данных пользователей, для изучения различных явлений, комбинации параметров, генерирует графики, поддерживает HDF, HDF-EOS. Предоставлена возможность выбора временного диапазона данных, один или несколько параметров из этого набора данных и тип вывода.



Рис. 2. Система космического мониторинга парниковых газов.

Создана возможность выбора временного диапазона данных, один или несколько параметров из этого набора данных, и тип вывода. Предоставляется выбор диапазона дат, селектор диапазона даты будет

выбирать год и месяц. Усредненная по времени карта отображает значения данных для каждой ячейки сетки в указанной пользователем области, усредненной (линейно) по заданному пользователем временному диапазону в качестве слоя карты. Значения заполнения не влияют на среднее значение времени. Сгенерированная карта может быть увеличена и развернута. Параметры сюжета включают установку минимальных и максимальных значений для цветовой шкалы и, в некоторых случаях, выбор других палитр. Карты векторной величины, такие как величины скорости ветра, вычисляют величину вектора на каждом временном шаге, прежде чем усреднять значения каждой ячейки сетки во времени. Векторные карты вычисляют средние значения широтной и продольной составляющих каждой ячейки сетки во времени и отображают полученные векторы. Анимация отображает отдельные карты временных интервалов переменной данных в анимированной последовательности. Каждый файл, включенный в анимацию, может быть загружен в ZIP-файл, содержащий каждое изображение в формате PNG. Они могут использоваться для создания анимированного видео в других приложениях. Для карт накопления доступно несколько переменных, в которых вместо усреднения с течением времени общая сумма вычисляется с течением времени для данной ячейки сетки. Карты месячного накопления заполняются, когда месячный средний график вычисляет средние значения для определенного месяца или трехмесячного периода, соответствующего метеорологическому сезону. Среднее вертикальное распределение метана по территории Казахстана за 2019 год представлено на рис. 3.

Средние значения вычисляются в течение лет, указанных на экране выбора, и отображаются на карте. Создана возможность выбора более одного месяца или сезона, сезонные средние значения для определенного месяца или трехмесячного периода, соответствующего метеорологическому сезону. Стандартный график временных рядов производится путем вычисления пространственных средних значений по выбранной пользователем области заданной переменной для каждого временного шага в пределах диапазона пользователя. Значения заполнения не влияют на пространственные средние значения. Каждое среднее значение затем рисуется со временем, чтобы создать выход временного ряда. Сезонная серия времени вычисляет усредненные по площади временные ряды на каждый год (рис. 4...6).

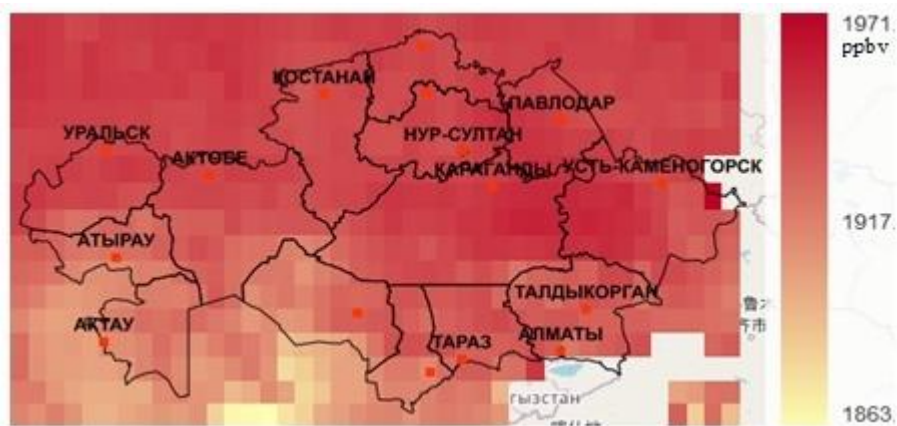


Рис. 3. Распределение метана на высоте 925 гПа по территории Казахстана за 2019 год.

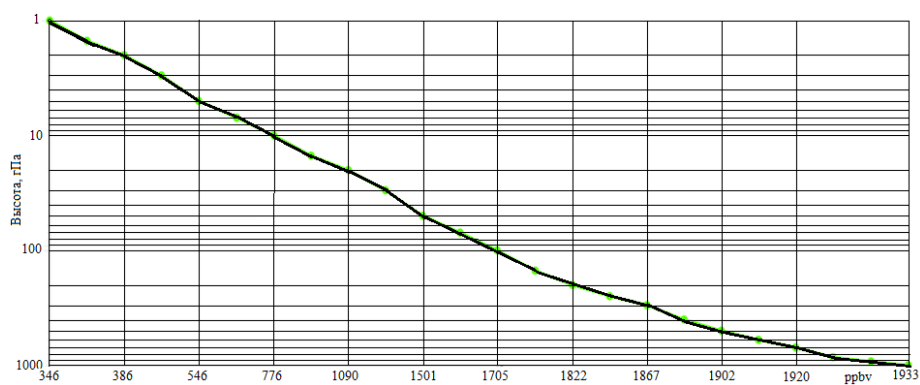


Рис. 4. Среднее вертикальное распределение метана по территории Казахстана за 2019 год.

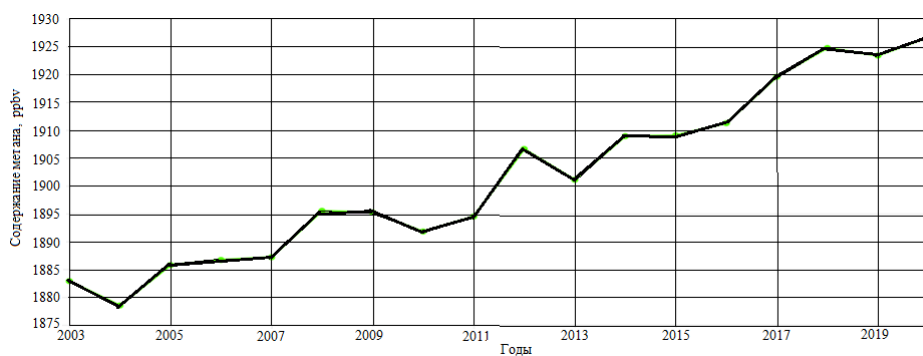


Рис. 5. Изменения содержания метана в зимний период с 2003 по 2019 годы по территории Казахстана.

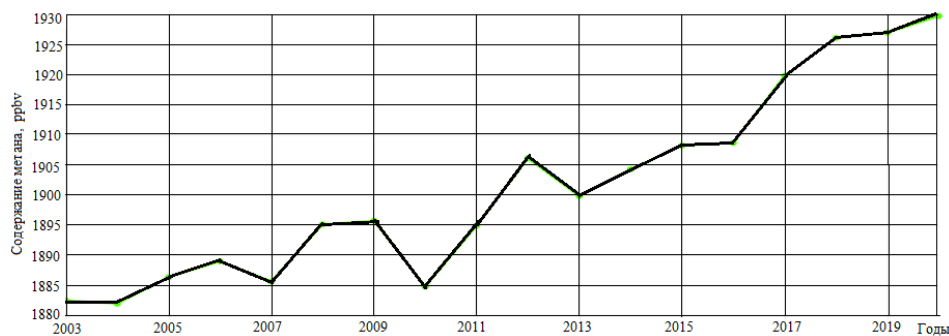


Рис. 6. Изменения содержания метана за январь месяц с 2003 по 2019 годы по территории Казахстана.

Разработанная система космического мониторинга парниковых газов будет способствовать обеспечению постоянного контроля за составом атмосферы, как важной части контроля за изменением климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. – Москва: Изд-во А и Б, 1997. – 297с.
2. Информационные бюллетени о состоянии окружающей среды 2017-2018 гг. РГП "Казгидромет" [Электр. ресурс] <https://kazhydromet.kz/ru/bulleten/okrsreda> (дата обращения 28.01.2019).
3. Фил ДеКола и Секретариат ВМО // Интегрированная глобальная информационная система по парниковым газам (ИГИСПГ). Бюллетень ВМО. 2017. – Том 66 (1) – С. 38-45.
4. Acker, J. & Leptoukh, G. (2007). Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data. // EOS, Transactions, American Geophysical Union.– 88 (2). – Pp. 14-17.
5. 'IBUKI' Chosen as Nickname of the Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT)" (Press release). JAXA. 15 October 2008. Retrieved 29 May, 2009.
6. Reichle R.H., Liu Q., Koster R.D., Draper C.S., Mahanama S.P.P. and Partyka G.S. Land surface precipitation in MERRA-2. // J. Climate. – 2017. – V. 30. – Pp. 1643-1664
7. Veefkind J.P.; Aben I.; McMullan K.; Förster H.; de Vries J.; Otter G.; Claas J.; Eskes H.J.; de Haan J.F.; Kleipool Q.; van Weele M.; Hasekamp O.; Hoogeveen R.; Landgraf J.; Snel R.; Tol P.; Ingmann P.; Voors R.; Kruizinga B.; Vink R.; Visser H.; and Levelt P.F. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A

GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications // Rse. – 2012. – Pp. 70-83.

Поступила 24.09.2020

| | |
|---------------------|-----------------|
| Техник. ғылым докт. | А.Х. Ахмеджанов |
| Техник. ғылым канд. | Т.К. Караданов |
| | Н.А. Кенжебеков |

ҚАЗАҚСТАН АТОМОСФЕРАСЫНДАҒЫ ПАРНИКТІК ГАЗДАРДЫ АЙМАҚТЫҚ ҒАРЫШТЫҚ МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЯСЫ

Түйінді сөздер: мониторинг, атмосфера, құрам, парниктік газдар, технология, климат, ақпараттық жүйе

Қазақстан аумағында атмосферадағы парниктік газдардың аймақтық ғарыштық мониторингінің ақпараттық жүйесін құру мәселелері қарастырылады. Атмосферадағы парниктік газдарға аймақтық ғарыштық мониторинг жүргізу үшін ақпараттық технология ұсынылады. Ақпараттық жүйе параметрлерінің құрамы, құрылымы және өзара байланысы сипатталған. Атмосферадағы парниктік газдардың аймақтық ғарыштық мониторингінің ақпараттық жүйесінің жұмысының сипаттамасы аяқталды. Қазақстан атмосферасындағы метан құрамының динамикасын зерттеудің негізгі нәтижелері келтірілген.

A.H. Akhmedzhanov, T.K. Karadanov, N.A. Kenzhebekov

TECHNOLOGY OF REGIONAL SPACE MONITORING OF GREENHOUSE GASES IN THE ATMOSPHERE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Key words: monitoring, atmosphere, content, greenhouse gases, technology, climate, information system

The issues of building an information system for regional space monitoring of greenhouse gases in the atmosphere over the territory of Kazakhstan are considered. An information technology is proposed for conducting regional space monitoring of greenhouse gases in the atmosphere. The composition, structure and relationship of the information system parameters are described. A description of the operation of the information system for regional space monitoring of greenhouse gases in the atmosphere has been completed. The main results of the study of the dynamics of methane content in the atmosphere of Kazakhstan are presented.