

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(РГГМУ)

УДК [556.162+556.131](66)

На правах рукописи

Бонгу Сотима Эрнесто

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕГО СТОКА И
ИСПАРЕНИЯ С ТЕРРИТОРИИ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ
ЗАПАДНОЙ АФРИКИ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Научный руководитель:
доктор техн. наук, профессор

В.В. Коваленко

Научный консультант:
кандидат техн. наук, доцент

Е.В. Гайдукова

Санкт-Петербург 2019

СОДЕРЖАНИЕ

| | Стр. |
|--|------|
| Сокращения | 4 |
| Введение | 5 |
| 1 Многолетний речной сток и испарение Западной Африки для существующего климата | 12 |
| 1.1 Физико-географическое описание изучаемых водосборов | 12 |
| 1.2 Формирование речного стока | 22 |
| 1.3 Формирование испарения | 26 |
| 1.4 Совместная база данных по стоку и испарению | 31 |
| 2 Многомерные кривые плотности вероятности стока и испарения для существующего гидрометеорологического режима | 51 |
| 2.1 Теоретические и эмпирические основания для перехода к использованию двумерных распределений | 51 |
| 2.2 Построение двумерных плотностей вероятности | 57 |
| 2.2.1 Выбор инструментария для автоматизации обработки совместных рядов стока и испарения | 57 |
| 2.2.2 Алгоритм построения двумерной гистограммы | 58 |
| 2.2.3 Алгоритм построения двумерной поверхности плотности вероятности | 60 |
| 2.3 Условные и безусловные кривые обеспеченности | 69 |
| 3 Одномерные многообразия кривых обеспеченности для существующего режима | 81 |
| 4 Сценарные оценки одномерных многообразий кривых обеспеченности для наиболее вероятного климатического сценария | 92 |
| 4.1 Климатические сценарии | 92 |
| 4.2 Сценарные одномерные многообразия | 110 |
| 4.3 Совместный анализ существующих и прогнозных одномерных многообразий | 117 |

| | |
|---|-----|
| Заключение | 119 |
| Список использованных источников | 121 |
| Приложение А – Хронологические графики гидрометеорологических элементов | 128 |
| Приложение Б – Разностно-интегральные кривые стока и испарения | 174 |
| Приложение В – Разностно-интегральные кривые температуры и осадков | 197 |
| Приложение Г – Эллипсы рассеивания, эмпирические гистограммы, теоретические плотности вероятности | 220 |
| Приложение Д – Условные и безусловные кривые обеспеченности | 243 |
| Приложение Е – Одномерные многообразия | 266 |
| Приложение Ж – Прогнозные одномерные многообразия на 2016–2035 гг. | 287 |
| Приложение И – Прогнозные одномерные многообразия на 2046–2065 гг. | 305 |
| Приложение К – Прогнозные карты статистических характеристик стока и испарения и их отклонений от фактических | 323 |
| Приложение Л – Выписка о прохождении педагогической практики | 347 |
| Приложение М – Справки о внедрении | 349 |

СОКРАЩЕНИЯ

- ВМО – Всемирная метеорологическая организация
- ФПК – Фоккер–Планк–Колмогоров
- FAO (ФАО) – Продовольственная и сельскохозяйственная организация
- ВМО – Всемирная метеорологическая организация
- РИК – разностно-интегральная кривая
- МКИД – Международный Комитет по Ирригации и Дренажу
- МГЭИК – Межправительственная группа экспертов по изменению климата
- СКО – среднеквадратическое отклонение

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. На протяжении многих десятилетий основным инструментарием при оценке формирования режима многолетнего речного стока служат его вероятностные распределения, получаемые по фактическим рядам инструментальных наблюдений. На их основе находятся расчетные гидрологические характеристики, с помощью которых строятся кривые обеспеченности и определяются значения проектных расходов, используемых при проектировании гидротехнических сооружений.

Однако в последнее время в связи с усложнением задач решаемых инженерной гидрологией, возникает необходимость привлекать и другие составляющие уравнения водного баланса речных водосборов наряду со стоком, в частности испарение и изменение суммарных влагозапасов речных бассейнов. Например, Л. Г. Бавиной (ГГИ) была разработана расчетная схема получения обеспеченного водного баланса неосушенных болот. В ней обеспеченное значение стока ($Q_{P\%}$) определяется разностью осадков той же обеспеченности ($X_{P\%}$) и испарения ($E_{P\%}$) обеспеченностью $(100 - P)\%$. По рекомендациям С. В. Сольского (ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева) обеспеченные значения суммарного испарения с суши необходимо учитывать при расчете стока техногенно-нагруженных территорий. Также они находят применение при выборе пункта и площадки для строительства атомных электростанций.

Сотрудники и аспиранты кафедры гидрофизики и гидропрогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) привлекают обеспеченные значения испарения и изменения суммарных влагозапасов (ΔU) для сценарных оценок гидрологических последствий изменения климата. Ими разработаны модели, описывающие эволюцию многомерных распределений плотности вероятности $p(Q, E, \Delta U; t)$, где t – время. Попыткой в этом направлении были исследования Ф. Л. Соловьева (защитился в РГГМУ в 2009 г.). Он для обеспечения устойчивости статистических моментов речного стока использовалось двумерное распределение $p(Q, E)$. Его ис-

следования ограничивались Европейской территорией России. Аспирантка Е. Ю. Голованова (защитилась в 2014 г.) использовала дополнительно к распределениям стока и испарения еще и распределения многолетних изменений суммарных влагозапасов речных бассейнов. Ее исследования касались всей территории России.

Для территории Африки подобные исследования проводились Куасси Би Гессан Арманом (2008). Им выполнена фрактальная диагностика рядов многолетнего стока, показавшая, что размерность пространства вложения меняется от 1 до 3 (в большинстве случаев она равна двум, т. е. для моделирования и прогнозирования вероятностного режима формирования стока Западной Африки надо привлекать как сток, так и испарение). Вопросам получения устойчивых статистических сценарных оценок многолетнего стока путем перевода мультипликативных шумов в аддитивные посвящена диссертация Хамлили Абделати́фа (Алжир, 2011 г.). В его работе дополнительные фазовые переменные (в виде испарения) не использовались, но потери на испарение учитывались аддитивно, т. е. через коэффициент стока, входящий во внешнее воздействие. Положительный результат достигался, но путем нарушения причинно-следственных связей (что приемлемо только для стационарных случайных процессов, в которых отсутствует временная эволюция статистических моментов). В 2015 г. в РГГМУ защитил диссертацию Куасси Куаме Модест (Кот-Д'Ивуар) также касающейся территории Западной Африки по которой выполнены сценарные оценки климатических изменений. Расчеты проводились в аддитивном варианте учета испарения и выявлялись географические закономерности появления аномально опасных зон полей многолетнего речного стока. Ближе всего теме нашей диссертации соответствуют исследования Диавара Хамиду, посвященные долгосрочной оценке вероятностных распределений годового испарения с территории Африки. В его работе (защитился в РГГМУ в 2015 г.) было показано, что вероятностные распределения испарения входят в класс К. Пирсона и поэтому для оценок

полностью применима методология РГГМУ, разработанная для стока на основе модели линейного формирующего фильтра.

Таким образом была актуализирована возможность использования совместных распределений стока и испарения не только практической потребностью, связанной с техногенным освоением территории Западной Африки, но и путем формирования необходимой базы гидрометеорологических значений, охватывающей как сток, так и испарение.

Цели и задачи исследования. Целью настоящего исследования является разработка и адаптация к условиям Западной Африки методики совместного учета вероятностных распределений стока и испарения с возможностью наглядного визуального представления их обеспеченных значений одномерным многообразием в многомерном пространстве.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– создание совместной синхронизированной базы данных по многолетним стоку, осадкам и температуре воздуха с целью генерации рядов годового испарения по методу Тюрка;

– выполнение совместной статистической обработки рядов стока и испарения (вычисление нормы, коэффициентов вариации, асимметрии и автокорреляции) с предварительным анализом ее возможности (построение разностно-интегральных кривых для определения наличия многоводных и маловодных периодов, исследование рядов на однородность по математическому ожиданию и дисперсии на различных уровнях статистической значимости);

– теоретическое обоснование и практическое построение двумерных плотностей вероятности $p(Q, E)$ для речных бассейнов Западной Африки;

– построение и анализ безусловных и условных распределений стока с использованием двумерных распределений $p(Q, E)$ с целью выявления степени повышения устойчивости условных распределений по сравнению с безусловными при уменьшении обеспеченности расходов воды;

– построение совместных одномерных многообразий обеспеченности стока и испарения для современного климата и для наиболее вероятностных климатических сценариев на XXI в.

Методика исследований и исходный материал. Решение поставленных задач основывалось как на использовании классических методов инженерной гидрологии (статистическая обработка сформированных совместных рядов стока и испарения), так и на методологии частично инфинитного моделирования, разработанной в РГГМУ (фрактальная диагностика рядов стока и испарения с целью определения размерности пространства вложения, исследование моделей формирования стока и испарения на устойчивость их решений – статистических моментов вероятностных распределений, модернизация моделей с целью обеспечения устойчивости и т. п.). В основе примененных методов прогнозирования лежали варианты модели линейного формирующего фильтра, обеспечивающие устойчивость решений за счет полной или частичной разгрузки от мультипликативного шума. Модель в различных вариантах прошла многочисленную апробацию на речных бассейнах Южной и Северной Америки, Африки и Евразии.

Реализация вычислений осуществлялась на персональном компьютере на базе среды разработки *Visual Basic* и приложения *MatLab*.

Исходным материалом для проведения расчетов служили ряды гидрометеорологических элементов, опубликованные в изданиях Всемирной метеорологической организации, а также карты Мирового водного баланса. Частично использованы материалы, полученные бывшим аспирантом РГГМУ, кандидатом технических наук Диавара Хамиду (республика Мали). Сценарные оценки выполнялись на базе пятого доклада (СМIP5) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC).

Научная обоснованность и достоверность результатов работы основывается на том обстоятельстве, что фрактальная диагностика, проведенная в предыдущих независимых исследованиях рядов стока и испарения Западной Африки Куасси Би Гессан Арманом и Диавара Хамиду, показала, что подав-

ляющее число рядов имеет размерность пространства вложения равную двум. Это объясняется тем, что из-за глубокого залегания грунтовых вод зона неполного насыщения принимает незначительное участие в процессах водообмена (поступающая в нее вода может рассматриваться как безвозвратные потери наряду с испарением, что и отражает формула Тюрка, в которой испарение часто называют обобщенно дефицитом влаги).

Что касается результатов статистических оценок, то выводы, сделанные на их основе в ходе исследования, получены либо в рамках, существующих в настоящее время, гидрологических нормативов, либо базируются на моделях Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК) и Пирсона прошедших апробацию почти на всех континентах.

Научная новизна и практическая значимость. В результате решения сформулированных задач были получены следующие основные результаты:

– Создана совместная синхронизированная (впервые) база данных по речному стоку и испарению с поверхности суши Западной Африки, в которую вошло 46 рядов, применимых для дальнейшего использования при 5 %-ом уровне статистической значимости.

– Впервые для Западной Африки получены двумерные эмпирические распределения $p(Q, E)$ по 46 водосборам, на основе которых сформированы безусловные и условные распределения обеспеченности речного стока, по которым проведена оценка степени чувствительности расходов различных обеспеченностей к замене безусловных распределений условными.

– Впервые построены совместные одномерные многообразия обеспеченности стока и испарения (для условных и безусловных распределений) для условий современного климата и для наиболее вероятного (*RCP4.5*, модели *ensemble*, *HadGEM2-ES*, *MPI-ESM-LR*) климатического сценария.

– Впервые на основе совместных одномерных многообразий обеспеченности стока и испарения построены карты 0,1 %, 1 %, 10 %-ой обеспеченности стока и испарения для современного и прогнозируемого климата и выявлены регионы ожидаемых статистически значимых отклонений (аномал

лий), в которых возможны негативные последствия для отраслей экономики, производственные функции которых включают речной сток или испарение (либо и то и другое).

Диссертационное исследование выполнялось в рамках Научно-исследовательской работы (НИР) «Адаптация математических моделей формирования вероятностных характеристик многолетних видов речного стока к физико-географическим условиям России для целей обеспечения устойчивости их решений при моделировании и прогнозировании» (№ госрегистрации 01 2014 58678). Результаты исследования внедрены в учебный процесс РГГМУ по специальности 05.04.05 – Прикладная гидрометеорология (направленность (профиль) – Прикладная гидрология) и переданы в Главное управление воды и Гидрометеорологическую службу Республики Бенин.

На защиту выносятся следующие положения:

– Методика получения двумерных распределений плотности вероятности стока и испарения, адаптированная к условиям Западной Африки путем выявления статистически приемлемых (уровень значимости 5 %) рядов для целей получения условных распределений речного стока, обладающих устойчивыми расчетными характеристиками (нормой и коэффициентом вариации).

– Совместные одномерные многообразия обеспеченности стока и испарения для условий современного климата и для наиболее вероятного (*RCP4.5*, модели *ensemble*, *HadGEM2-ES*, *MPI-ESM-LR*) климатического сценария.

– Географические карты Западной Африки для стока и испарения 0,1 %, 1 % и 10 %-ой обеспеченности для фактических и сценарных климатических условий, полученные как следствие совместных одномерных многообразий обеспеченности.

– Оценки чувствительности одномерных многообразий обеспеченности к уменьшению значений обеспеченности расходов воды, показывающие ее увеличение.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на заседаниях Итоговой секции Ученого Совета РГГМУ в 2015 и 2016 гг., и семинарах кафедры гидрофизики и гидропрогнозов гидрологического факультета РГГМУ. Также промежуточные результаты работы были представлены на конференциях: *XLI* Международная заочная научно-практическая конференция «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2014), *XVI* Международная научно-практическая конференция (Москва, 2014), *VIII* и *IX* Всероссийская научная экологическая конференция «Вода – источник жизни на Земле» (Санкт-Петербург, 2015, 2016), *XI* Международный Большой географический фестиваль «Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета» (Санкт-Петербург, 2015), *III* Международная научно-практическая конференция «Технические науки в мире: от теории к практике» (Ростов-на-Дону, 2016) и *International Conference on Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management* (Китай, 2014).

По теме диссертации опубликовано 15 статей, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 в зарубежных изданиях (2 – в высокорейтинговых журналах).

Личный вклад автора. Научные положения, выносимые на защиту, получены лично автором. В публикациях, подготовленных в соавторстве, автору принадлежат формулировка задач, сбор и обработка исходных данных по речным бассейнам Западной Африки.

1 МНОГОЛЕТНИЙ РЕЧНОЙ СТОК И ИСПАРЕНИЕ ЗАПАДНОЙ АФРИКИ ДЛЯ СУЩЕСТВУЮЩЕГО КЛИМАТА

1.1 Физико-географическое описание изучаемых водосборов

Глава написана с использованием источника [1].

Африка – единственный материк Земли, занимающий примерно одинаковое расстояние в северном и южном полушариях. Эта особенность создает условия для формирования одинаковых типов климата на одних и тех же широтах в обоих полушариях.

Условия образования климата в Африке к северу и югу от экватора разные, так как, во-первых, северная часть материка по площади в два раза больше южной, которая расположена к югу от экватора. Во-вторых, к северу и северо-востоку от Африки находится суша Евразии, от которой Африку отделяют теплые межконтинентальные моря – Средиземное и Красное. В-третьих, южный субконтинент расположен между Атлантическим и Индийским океанами [1].

В течение года большое количество солнечного тепла получает основная часть материка, расположенная между тропиками, и вследствие этого сильно прогревается, особенно в северной, более массивной части. «Вся Африка (за очень небольшим исключением) получает в год более 6700 МДж/м^2 (160 ккал/см^2), а в северной части суммарная радиация превышает 8400 МДж/м^2 (200 ккал/см^2)» [1].

Слабая горизонтальная расчлененность и приподнятость окраин по сравнению с внутренними частями ограничивают влияние океанов и создают в Африке континентальный климат, очень сильно выраженную в северной части благодаря ее размерам и близкому соседству с Евразией.

Большая часть Африки находится под влиянием субтропических максимумов и пассатной циркуляции обоих полушарий. Пассаты северного по-

лушария, которые приходят с суши, несут континентальный воздух с малой относительной влажностью. Пассаты южного полушария, приходящие со стороны Индийского океана, выносят на восточную окраину материка массы влажно-неустойчивого воздуха.

Западные окраины материка в северном и южном полушариях находятся под воздействием восточной периферии атлантических субтропических максимумов с присущей им пассатной инверсией, которая увеличивается холодными течениями Атлантического океана. Это создает негативные условия для выпадения осадков.

В приэкваториальной части материка главное значение имеет переход воздушных масс из одного полушария в другое. При этом на востоке материка пассаты перетекают из зимнего в летнее полушарие. А на западе (так как градиент давления всегда направлен от Южно-Атлантического максимума в сторону северного субконтинента Африки) попадание южного пассата (юго-западного муссона) в северное полушарие наблюдается в течение всего года. И как следствие этого в полосе между 17° с. ш. и 20° ю. ш. летом каждого полушария отражает воздействие экваториальных муссонов, несущих влажно-неустойчивый экваториальный воздух и осадки.

Крайний север и крайний юг материка, заходящие в пределы субтропических поясов, зимой каждого полушария оказываются в условиях западной циркуляции, которые свойственны умеренным широтам [1].

В январе южная часть материка нагревается больше, а северная относительно охлаждена (рисунок 1.1).

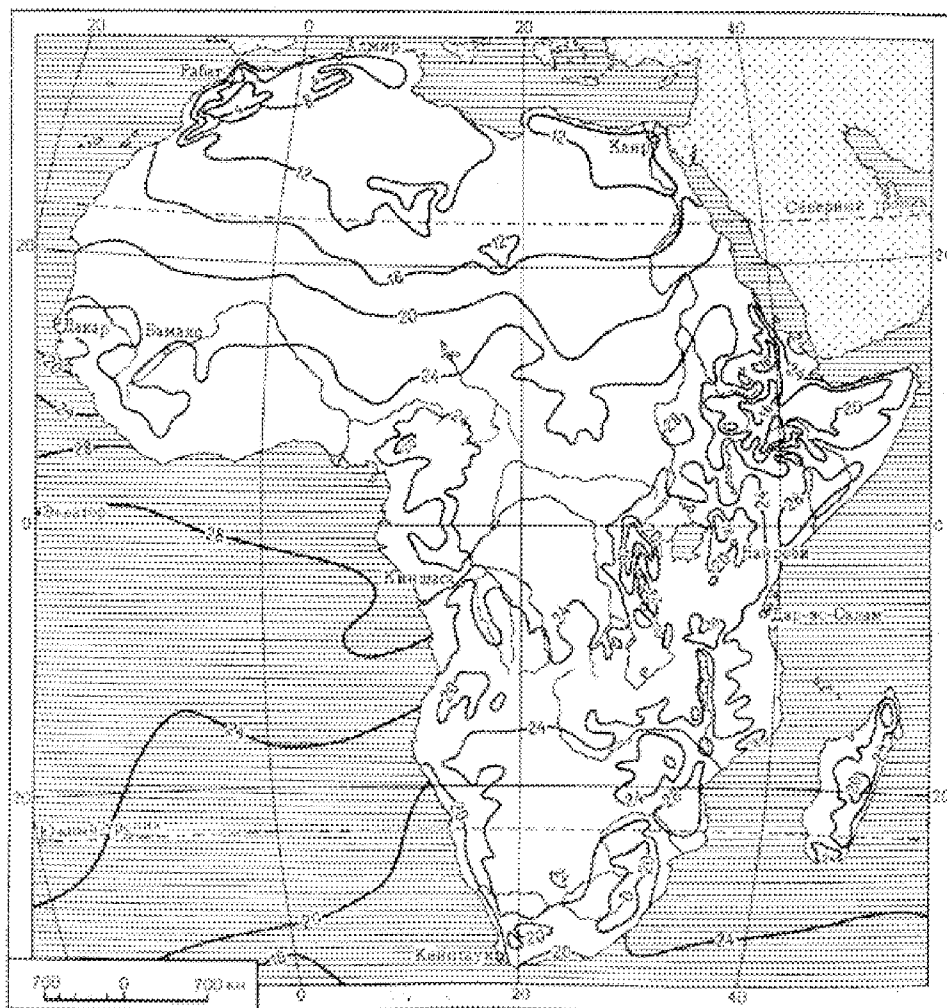


Рисунок 1.1 – Средняя температура воздуха в Африке на уровне земной поверхности в январе [1].

Поэтому субтропический пояс высокого давления пересекает север Сахары и смыкается с Северо-Атлантическим максимумом. Крайний северозапад материка попадает зимой под действие западной циклонической циркуляции небольших широт.

«А вместе с этим, над южным полушарием устанавливается обширная депрессия, в сторону которой устремляется воздух, как с соседних океанов, так и со стороны северного полушария» [1].

Северный пассат движется от 25° с. ш. в сторону экватора в виде трех основных потоков нагретого воздуха с относительной влажностью от 30 до 15 %. В большей восточной части это так называемое египетское течение северо-восточного направления проходит до северной части бассейна Конго,

через экватор не переходит. Восточнее действует еще более сухой аравийский пассат, захватывающий полуостров Сомали и проникающий южнее экватора, где он сливается с юго-восточным пассатом, который идет с Индийского океана по периферии Южно-Индийского максимума. К западу от египетского течения в сторону Гвинейского побережья движется так называемый харматтан, который в северной части Гвинейского залива встречается с юго-западным муссоном, оттекающим по восточной периферии Южно-Атлантического максимума. В большинстве случаев, харматтан не достигает побережья Гвинейского залива, и там доминируют малые юго-западные ветры. Но на больших высотах пассат проникает дальше к югу и препятствует восходящим токам в юго-западном муссоне и выпадению осадков. Вследствие чего январь на Гвинейском побережье – самый сухой месяц.

Южно-Индийский максимум в январе бывает больше сдвинут на юг. Он охватывает крайний юг Африки и дает начало юго-восточному пассату, который приносит с Индийского океана обильные осадки на восточные склоны высоких нагорий Африки. Количество осадков резко убывает при движении в глубь материка, достигая минимума в центральной части Калахари.

Западное побережье Африки пребывает под воздействием восточной периферии Южно-Атлантического максимума. «В связи с приходом на прогретый материк относительно холодных воздушных масс, выносимых из более высоких широт ветрами южных румбов, осадки на западном побережье отсутствуют в полосе, протягивающейся почти до самого экватора» [1].

В районе соприкосновения атлантического воздуха с массами, поступающими с Индийского океана, образуется фронт, поэтому на западе Калахари количество осадков увеличивается по сравнению с более западными и восточными районами материка.

В июле сильнее нагревается северное полушарие (рисунок 1.2).

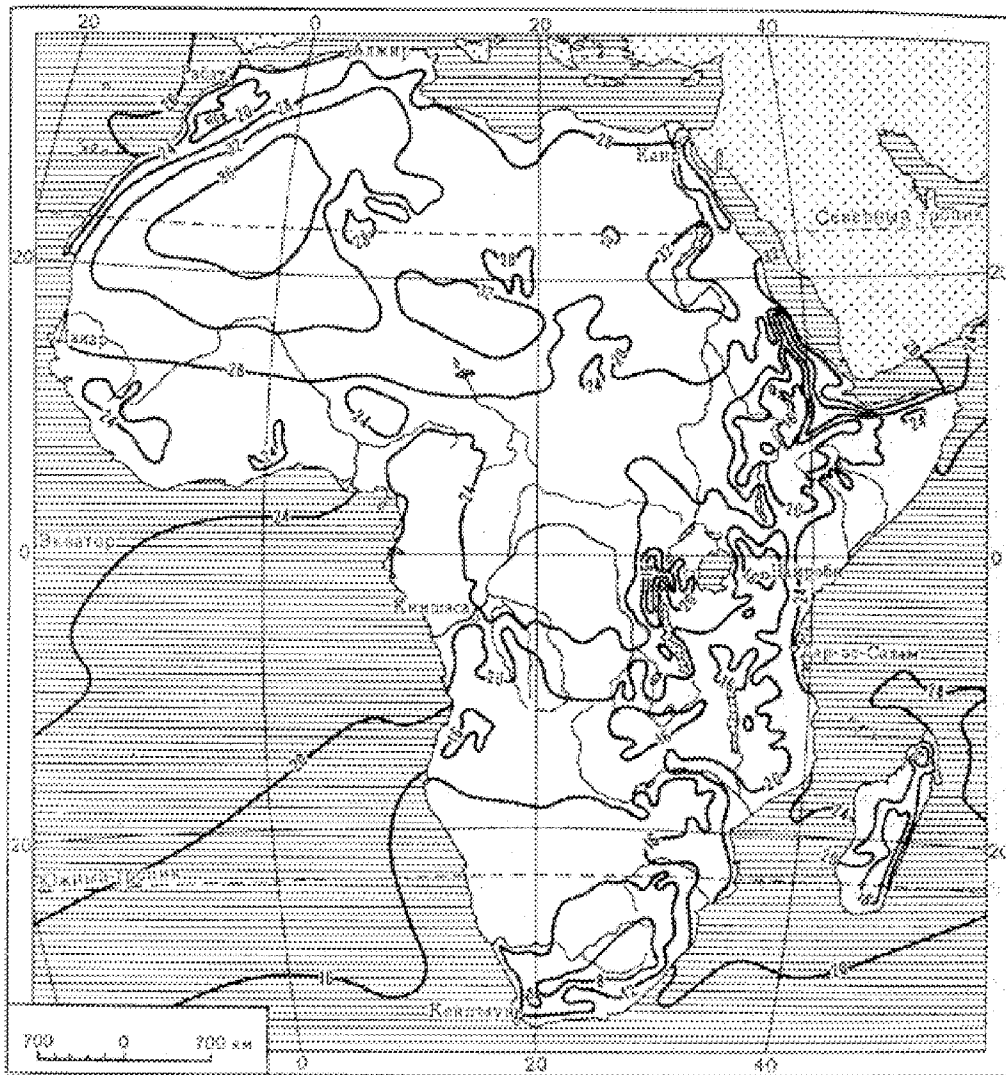


Рисунок 1.2 – Средняя температура воздуха в Африке на уровне земной поверхности в июле [1].

И поэтому все барические зоны сдвигаются к северу. Субтропический максимум северного полушария передвигается на Средиземное море и Южную Европу, забирающая только крайний северо-запад Африки. В связи с сильным нагреванием над северной частью Африки образуется область мало-го давления, простирающаяся до экватора. Южная Африка вместе с соседни-ми океанами входит в зону барического максимума южного полушария. И только крайний юг ее оказывается в условиях западной циркуляции умерен-ных широт южного полушария.

В Северной Африке (Сахаре) дуют сухие северо-восточные и северо-западные ветра, вдоль в длину Красного моря и долины Нила они проникают

до 20, а на западе – до 18° с.ш. Навстречу им, со стороны Южно-Атлантического максимума, движется юго-западный муссон, который несет влажно-неустойчивый воздух на территорию Судана и Гвинейского побережья. В этих районах идут дожди.

Эфиопия, Сомали и весь восток Африки к северу от экватора находятся под воздействием Индийского муссона, который является продолжением юго-восточного пассата, которая переходит через экватор и приносящего обильные дожди.

Почти во всей южной части Африки в пределах пояса большого давления с пониженной пассатной деятельностью погода в это время сухая, особенно во внутренних районах. За исключением Капской области, для которой характерна активизация циклонической деятельности по полярному фронту.

Большие температуры в течение всего года на основной части Африки зависят от высоты солнца над горизонтом и сильной инсоляции. В большей части материка средняя годовая температура превышает 20 °С. Северная часть Африки более массивна, поэтому в целом она нагревается более, чем южная, и там бывает самая высокая средняя месячная (от 35 до 40 °С), а также наиболее высокая максимальная температура (до 58 °С), наблюдаемая на Земле.

Для всей Африки типичны значительные суточные колебания температуры как проявление континентальности климата. Так, например, в Сахаре суточные амплитуды температуры достигают 50°С [1].

Осадки распределяются по территории материка совсем не одинаково. «Регулярные и обильные конвективные дожди выпадают в приэкваториальной части, примерно между 5° с. ш. и 10° ю. ш. Максимальные осадки в Африке (около 10000 мм) зафиксированы на склонах массива Камерун, обращенных в сторону господствующих юго-западных ветров» [1].

«В областях к северу и югу от экватора, примерно до 17° в обоих полушариях, осадки объясняются экваториальным муссоном и выпадают летом каждого полушария; годовые суммы которых сильно колеблются в зави-

симости от географического положения и рельефа» [1]. Еще дальше на север и юг от экватора (до 30°) расположены области с небольшим годовым количеством осадков (рисунок 1.3).

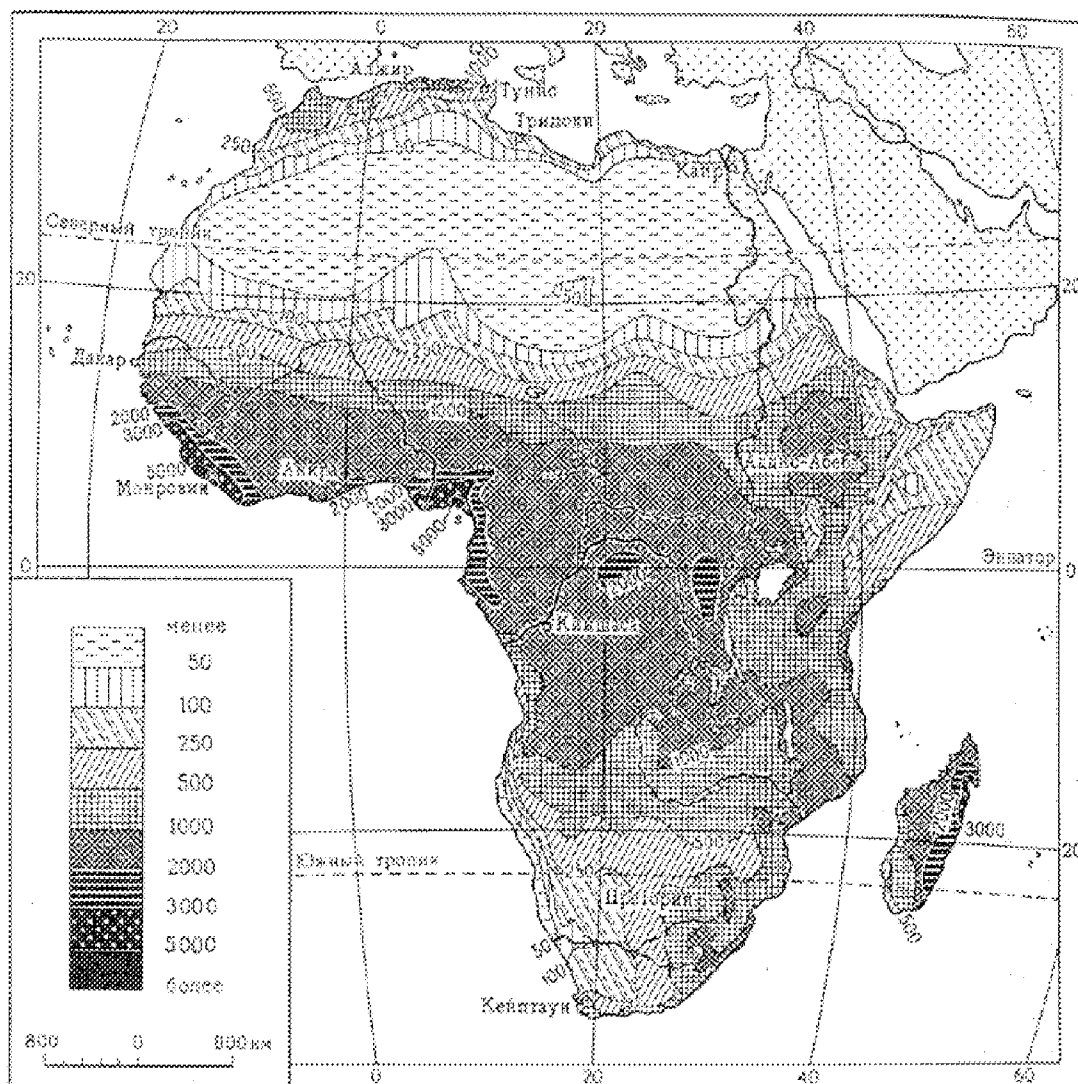


Рисунок 1.3 – Среднемесячное количество осадков в Африке, мм [1].

На крайнем севере и крайнем юге материка, в субтропическом поясе количество осадков снова увеличивается, и их максимум на северо-западе и юго-западе выпадает на зиму, и на юго-востоке – на лето.

В связи с вышеупомянутым Африка имеет большое разнообразие типов климата.

Область влажного экваториального климата охватывает большую часть бассейна Конго, примерно между 5° с. ш. и 5° ю. ш., а также Гвинейское по-

бережье до 7–8° с. ш. В бассейне Конго сильно нагревается поверхность, поэтому, выпадают конвективные осадки в течение всего года.

В режиме их ясно выражены два максимума, связанные с наиболее высоким положением солнца. Объяснить осадки на побережье Гвинейского залива можно преобладающими юго-западными ветрами и их большим годовым количеством. Высокие и равномерные температуры (от 24 до 28 °С), большое количество осадков, в 1,5–2 раза превышающее испаряемость, и высокая относительная влажность воздуха создают условия постоянного избыточного увлажнения. Из-за этого климат экваториальной части Африки тяжело переносят не только непривычные к нему европейцы, но и местные жители.

Субэкваториальный пояс в Северной Африке проходит на север до 17° с. ш. В южном полушарии пояс субэкваториального климата не доходит до Атлантического океана, на юг простирается почти до 20° ю. ш. В летнее время каждого полушария господствует муссон, приносящий влажный экваториальный воздух и сильные осадки. Зимой субэкваториальный пояс оказывается под воздействием пассата, который приносит массы сухого тропического воздуха. Это период полного отсутствия дождей и очень низкой относительной влажности [1].

Длительность влажного периода, годовые суммы осадков и увлажнение в пределах пояса меняются от экватора в сторону тропиков и в направлении с запада на восток. От экватора к тропикам с течением времени понижается длительность влажного периода от 10 до 2–3 мес [1]. С запада на восток уменьшается количество осадков, это связано со спадом муссона. Более засушливые районы в пределах субэкваториального пояса северного полушария располагаются на полуострове Сомали, который огражден от экваториального муссона Эфиопским нагорьем, и в северной части Судана, на границе с тропическим поясом. Температуры в субэкваториальных поясах высокие в течение большей части года, но годовые различия выражены больше, чем в экваториальном поясе. Самое жаркое время бывает в начале дождливого се-

зона, когда средняя температура превосходит 30 °С. Впрочем, в самые прохладные месяцы средняя температура не бывает ниже 20 °С.

Большие территории Африки, особенно в северном полушарии, характеризуются аридным тропическим климатом.

В северном полушарии жаркий сухой тропический климат типичен для Сахары. Летом поверхность Северной Африки очень нагревается и туда направляется северо-восточный пассат, приносящий воздух с относительной влажностью от 15 до 30 %. В зимнее время над Северной Африкой антициклональный режим, отсюда следует, что в течение всего года условия над Сахарой не благоприятствуют выпадению осадков. Сухость воздуха и небольшая облачность в комбинации с почти полным отсутствием растительности формируют условия для резких суточных колебаний температур. Испаряемость примерно в 20–25 раз превышает фактическое испарение [1].

Очень засушлив климат и у побережья Красного моря и Аденского залива. Зимний северо-восточный пассат, минуя Красное море, почти не пропитывается влагой и дает мало осадков на самом побережье. Летний муссон, передающий осадки в область Судана, оставляет огромное количество влаги на западных и юго-западных склонах Эфиопского нагорья. На восточное побережье он попадает в виде фена и осадков не дает, поэтому на берегах Красного моря и Аденского залива располагаются одни из самых жарких и сухих районов Земли [1].

В южном полушарии засушливый тропический климат, который присущий для котловины Калахари, однако количество осадков там немного больше, чем в Сахаре, благодаря юго-восточному пассату, дующему с Индийского океана.

Преимущественно большое количество осадков этот пассат приносит на побережье Мозамбикского пролива и склоны Драконовых гор. В виду этого на восточной окраине тропического пояса южного полушария в Африке выделяется область влажного пассатного климата.

Для западных окраин материка в тропическом поясе северного и южного полушарий, где у берегов влияет воздействие восточной периферии атлантических максимумов, типичен климат береговых пустынь. Властвующие ветры, которые дуют в сторону экватора, создают на поверхности океана потоки относительно холодных вод – Бенгельское и Канарское холодные течения. Образующийся над ними охлажденный воздух восточной периферии атлантических максимумов притекает на прогретую поверхность материка, создавая инверсию температуры. Воздух, пришедший с океана, содержит существенное количество водяных паров, но при изменении конденсация этих паров не происходит и осадков выпадает очень мало, хотя относительная влажность воздуха большая [1]. Температуры низкие (среднемесячная, как правило, ниже 21 °С), и суточные амплитуды менее важны, чем в континентальных пустынях. Дожди в юго-западной части Африки (пустыня Намиб) выпадают даже реже, чем в Сахаре, но зато часто бывают обильные росы и туманы, влагу которых поглощают некоторые растения. Влажность и духоту прибрежных пустынь человек переносит труднее, чем сухую палящую жару континентальной пустыни.

Пояса субтропического климата окружают крайний север и юг Африки. На северо-западе и юго-западе материка выделяются области субтропического климата с сухим летом. В это время окраины Африки, расположенные в субтропических широтах, попадают под влияние тропических антициклонов с устойчивым состоянием атмосферы, высокими температурами и отсутствием дождей. В зимний период характерна циклоническая деятельность, и выпадают осадки. Для северо-запада Африки типичны более существенные температурные различия по сезонам, чем для юго-запада. На побережье Средиземного моря средняя июльская температура достигает от 27 до 28 °С, а средняя температура января от 11 до 12 °С. На Капском побережье средняя температура самого теплого месяца не превышает 21 °С, а самого прохладного от 13 до 14 °С [1].

Субтропический климат юго-востока Африки обладает равномерным распределением осадков в течение года. Зимой они связаны с западным переносом, а летом на всем юго-восточном побережье дуют ветры с Индийского океана, которые приносят значительное количество влаги на восточных склонах Драконовых гор.

1.2 Формирование речного стока

В данном разделе описывается процесс формирования базы данных расходов воды. Выбирались речные бассейны, площади которых находятся в пределах от 1000 км² до 50000 км², т. е. речной сток на которых формируется под воздействием зональных факторов, исключается влияние азональных и полизональных факторов, которые характерны для площадей до 1000 км² и больше 50000 км² соответственно. Еще одним критерием отбора водосборов было наличие продолжительного периода наблюдения за стоком. Таким образом, было отобрано 46 водосборов расположенных на территории Западной Африки [2]. Так как гидрологические расчеты и построение карт статистических характеристик речного стока производится относительно центра водосбора, то последние были определены методом средневзвешенных площадей. В таблице 1.1 представлен список выбранных водосборов с координатами центров и площадями. На рисунке 1.4 показано распределение центров водосбора по территории Западной Африки.

Таблица 1.1 – Речные бассейны Западной Африки

| № | Код | Река | Станция | Широта, град. | Долгота, град. | F , км ² |
|---|---------|----------|------------|------------------|-------------------|--------------------------|
| 1 | 1634550 | Milo | Konsankoro | 8,85 | -8,14 | 1000 |
| 2 | 1634100 | Tinkisso | Dabola | 10,60 | -11,33 | 1260 |

| № | Код | Река | Станция | Широта, град. | Долгота, град. | F, км ² |
|----|---------|-------------|-----------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------|
| 3 | 1634200 | Niger | Faranah | 9,64 | -10,69 | 3180 |
| 4 | 1634500 | Milo | Kankan | 10,46 | -7,11 | 9620 |
| 5 | 1634420 | Niandan | Baro | 9,67 | -9,88 | 12770 |
| 6 | 1634400 | Niger | Kouroussa | 10,13 | -10,57 | 18000 |
| 7 | 1634800 | Sankarani | Mandiana | 9,64 | -8,43 | 21900 |
| 8 | 1734480 | Irane | Koutakoukrou | 10,85 | 2,93 | 1250 |
| 9 | 1726100 | Couffo | Lanhounta | 7,32 | 1,76 | 1680 |
| 10 | 1734400 | Alibori | Route Kandi-Banikoara Amont | 10,65 | 2,42 | 8170 |
| 11 | 1734410 | Alibori | Route Kandi-Banikoara Aval | 10,65 | 2,40 | 8170 |
| 12 | 1732100 | Mono | Athieme | 6,96 | 1,73 | 21575 |
| 13 | 1731400 | Pendjari | Porga | 10,31 | 1,16 | 22280 |
| 14 | 1733300 | Oueme | Pont De Save | 9,14 | 2,11 | 23600 |
| 15 | 1733600 | Oueme | Bonou | 8,76 | 2,33 | 46990 |
| 16 | 1434780 | Bagoé | Tombougou 1 | 9,59 | -6,65 | 2580 |
| 17 | 1530100 | Tano | Alanda | 6,40 | -2,48 | 15800 |
| 18 | 1134040 | Sankarani | Gouala | 10,18 | -8,45 | 35300 |
| 19 | 1112200 | Faleme | Gourbassy | 12,49 | -11,35 | 15000 |
| 20 | 1928745 | Comoe | Diarabakoko | 10,68 | -4,84 | 2350 |
| 21 | 1931370 | Black Volta | Boromo | 12,60 | -3,32 | 37140 |
| 22 | 1234680 | Maradi | Madarounfa | 12,92 | 7,35 | 5400 |
| 23 | 1234120 | Dargol | Kakassi | 13,92 | 0,80 | 6940 |
| 24 | 1234050 | Garouol | Dolbel | 14,24 | 0,17 | 7500 |

| № | Код | Река | Станция | Широта, град. | Долгота, град. | F , км ² |
|----|---------|---------|--------------|------------------|-------------------|--------------------------|
| 25 | 1234130 | Sirba | Garbe-Kourou | 13,28 | 0,05 | 38750 |
| 26 | 1234080 | Garouol | Alcongui | 14,74 | 0,47 | 44900 |
| 27 | 1337251 | Tsanaga | Bogo | 10,62 | 14,20 | 1535 |
| 28 | 1337151 | Bini | Berem | 7,47 | 7,70 | 1585 |
| 29 | 1337100 | Vina | Lahore | 7,23 | 13,92 | 1690 |
| 30 | 1338271 | Ndjeke | Ngongon | 5,13 | 12,26 | 3720 |
| 31 | 1338401 | Mape | Magba | 6,01 | 12,73 | 4020 |
| 32 | 1338200 | Noun | Bafoussam | 5,76 | 10,43 | 4700 |
| 33 | 1348100 | Dja | Somalomo | 3,34 | 13,29 | 5150 |
| 34 | 1339012 | Nyong | Ayos | 4,02 | 12,86 | 5300 |
| 35 | 1336500 | Cross | Mamfe | 5,59 | 9,65 | 6810 |
| 36 | 1337200 | Mbere | Mbere | 6,99 | 14,74 | 7430 |
| 37 | 1339011 | Nyong | Akonolinga | 4,01 | 12,86 | 8350 |
| 38 | 1348151 | Kadei | Batouri | 4,44 | 14,01 | 8970 |
| 39 | 1338201 | Lom | Betare-Oya | 6,06 | 14,08 | 11100 |
| 40 | 1339015 | Nyong | Kaya | 3,30 | 11,51 | 19985 |
| 41 | 1340500 | Ntem | Ngoazik | 2,28 | 11,99 | 18100 |
| 42 | 1339017 | Nyong | Olama | 3,76 | 12,21 | 18510 |
| 43 | 1348152 | Kadei | Pana | 4,68 | 14,08 | 20370 |
| 44 | 1338600 | Djerem | Mbakaou | 6,95 | 13,11 | 20390 |
| 45 | 1338300 | Mbam | Goura | 5,65 | 13,36 | 42300 |
| 46 | 1537180 | Logone | Moundou | 4,55 | 14,93 | 33970 |

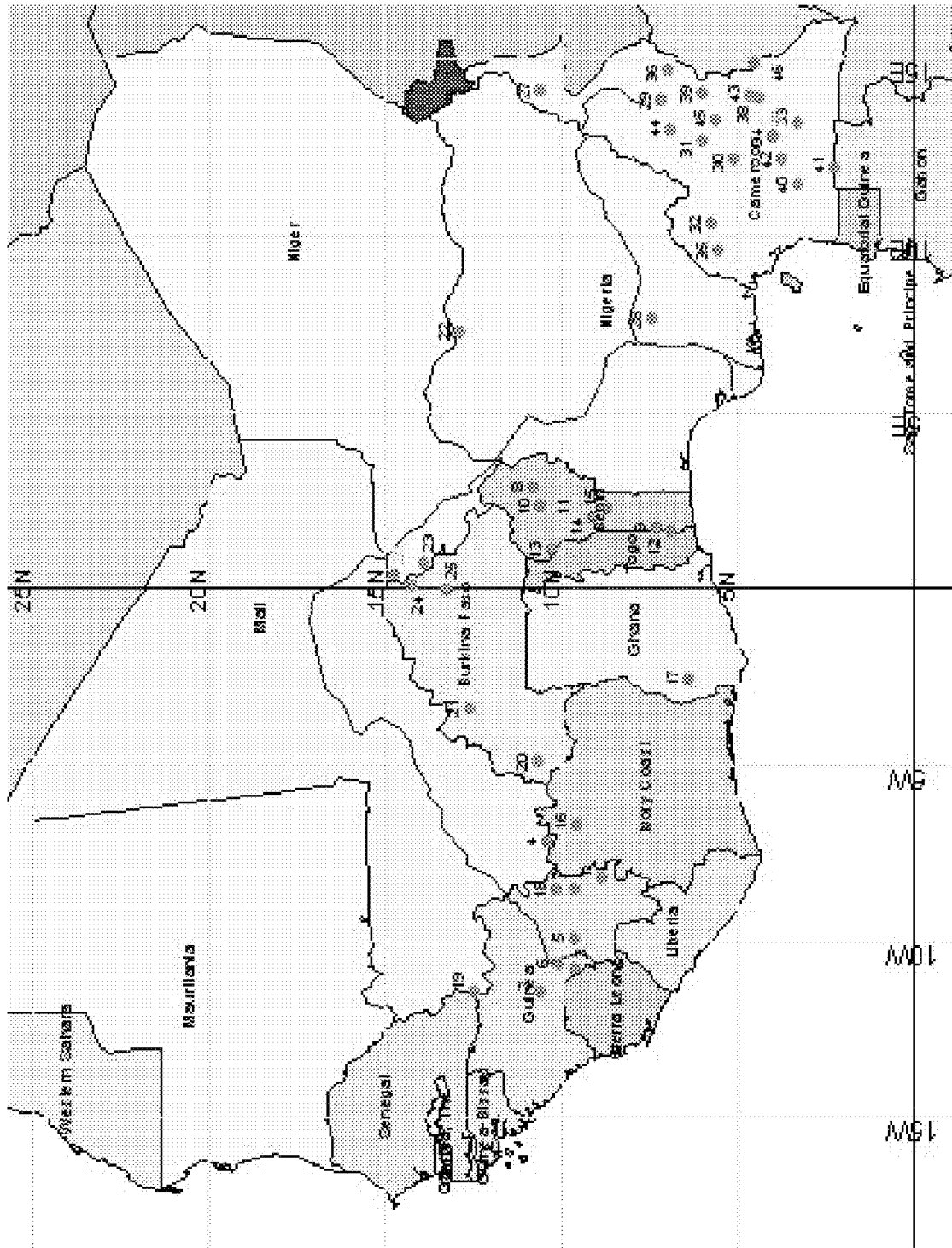


Рисунок 1.4 – Местоположение центров выбранных для исследования водосборов.

1.3 Формирование испарения

В настоящем разделе приводится материал, полученный совместно с Гайдуковой Е. В. и Диавара Х. [4], обосновывающий выбор формул для расчета испарения.

Ряды испарения генерировать по формуле Тюрка, включающей сумму годовых осадков и среднегодовую температуру воздуха, информация по которым была взята из данных Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) Соединенных Штатов Америки (США) [3]. Значения метеовеличин привязаны к географической сетке с шагом один градус по широте и долготе. Для целей исследования эти значения были проинтерполированы и привязаны к центрам рассматриваемых водосборов. База ВМО на момент написания диссертации предоставляла данные по среднегодовой температуре для Африканского континента только до 1990 года. В связи с этим информация по осадкам и расходам воды также ограничена 1990 годом для возможности формирования совместной гидрометеорологической базы данных необходимой для данного исследования.

Выбор формулы Тюрка обусловлен проведенным критическим анализом [4] методов расчета испарения для условий Африки.

Рассмотрим основные методы расчета испарения.

Расчет испарения по уравнению водного баланса

Уравнение водного баланса за годовой период времени записывается в следующем виде:

$$X = h + E \pm \Delta U, \quad (1.1)$$

где X – атмосферные осадки, выпавшие на водосбор, мм;

h – слой речного стока в замыкающем створе, мм;

ΔU – изменение суммарных влагозапасов в речном бассейне, мм.

Из уравнения (1.1) можно найти значение испарения:

$$\bar{E} = \bar{X} - \bar{h} \mp \Delta U. \quad (1.2)$$

Для водосборов Африки данный метод имеет ограничение в применимости, связанное с недостатком материалов независимых наблюдений за всеми составляющими водного баланса.

Расчет испарения по уравнению связи М. И. Будыко

Одним из наиболее физически обоснованных методов расчета величины испарения является метод М. И. Будыко, который основан на уравнении теплового баланса подстилающей поверхности. Уравнение связи М. И. Будыко имеет следующий вид [5]:

$$E = \sqrt{\frac{RX}{L} \left(1 - e^{-\frac{R}{XL}} \right) \operatorname{th} \frac{XL}{R}}, \quad (1.3)$$

где E – норма годового испарения, мм;

R – среднемноголетний (норма) радиационный баланс увлажненной поверхности, ккал/см²;

X – норма годовых осадков, мм;

L – удельная теплота парообразования (скрытая теплота испарения), ккал/г;

e – основание натурального логарифма.

Метод Будыко применяется для определения нормы испарения. Он не может быть использован для целей генерирования многолетних рядов суммарного годового испарения.

Метод П. С. Кузина

Метод расчета испарения с поверхности бассейна, разработанный П. С. Кузиным, основан на предположении о пропорциональности величины

испарения с поверхности бассейна в зоне достаточного увлажнения дефициту влажности воздуха [6].

Результаты работы Кузина представлены в виде графика зависимости испарения с поверхности бассейна ($E_{\text{мес}}$) от среднемесячной температуры воздуха ($T_{\text{мес}}$) (рисунок 1.5).

По методу Кузина годовые суммы испарения определяются снятием с графика месячных сумм испарения по средним месячным температурам воздуха и с последующим суммированием их за год.

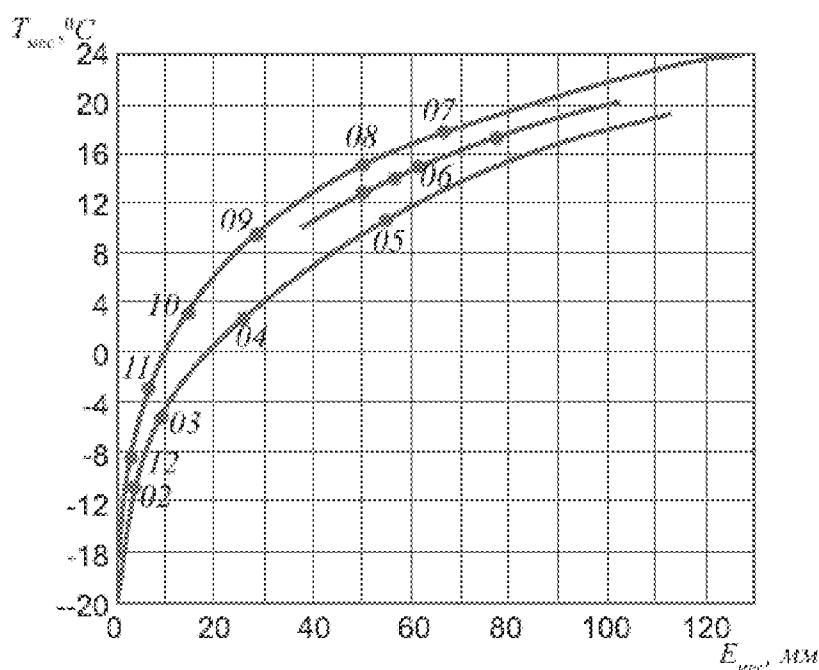


Рисунок 1.5 – Зависимость испарения с поверхности бассейна от температуры воздуха по П. С. Кузину.

Данный метод разработан для зон достаточного увлажнения. Номограмма ограничена по оси ординат значением среднемесячной температуры 24 °C. Для Африканских водосборов среднемесячные температуры воздуха могут превысить максимальное значение номограммы.

Расчет испарения по температуре воздуха и упругости водяного пара

Данный метод разработан А. Р. Константиновым [7]. В его основе лежит схема расчета испарения по градиентным данным. Схема дана в виде

номограмм, с помощью которых по температуре и упругости водяного пара определяются значения суточного, сезонного и годового испарений. График расчета годовых величин испарения (мм/год) по средним годовым значениям температуры и упругости водяного пара, измеренным на высоте 2,0 м, представлен на рисунке 1.6.

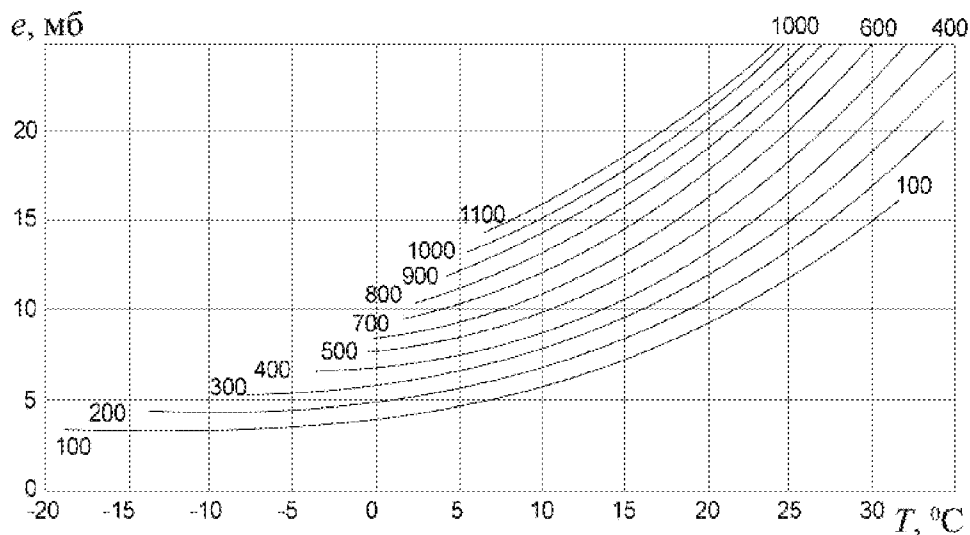


Рисунок 1.6 – График для расчета годовых величин испарения (мм/год).

Метод Константинова разработан для конкретных диапазонов изменения температуры и упругости водяного пара. Его применение для других климатических зон связано с трудностями экстраполяции изолиний испарения [8], которые могут привести к получению неправдоподобных значений.

Расчет испарения по уравнению Тюрка

Расчетная формула годового испарения по методу Тюрка разработана на основе результатов исследований процесса испарения на 254 речных бассейнах [9], расположенных на всех континентах, и имеет следующий вид:

$$E = X / \sqrt{0,9 + \frac{X^2}{(300 + 25T + 0.05T^3)^2}}, \quad (1.4)$$

где E – суммарное годовое испарение, мм/год;

X – годовое количество осадков, мм/год;

T – среднегодовая температура воздуха, °С.

Метод Тюрка, в отличие от двух предыдущих методов, обладает универсальным характером, так как он применим для любых сочетаний значений температуры и осадков. «Но с другой стороны, данный метод, по сути своей, не особо отличается от метода водного баланса потому, что по нему можно определить не реальное испарение с поверхности водосбора, а совокупность потерь, включающую, например, инфильтрацию. Следовательно, можно сказать, что полученные этим методом потери (дефицит стока) будут почти сопоставимы с реальными значениями испарения для тех территорий, где испарение является преобладающим из всех потерь, так как остальные потери настолько малы по сравнению с испарением, что ими можно пренебречь.» [4].

Расчет испарения по методу Пенмана–Монтейна

Метод Пенмана–Монтейна рекомендован Продовольственной и Сельскохозяйственной Организацией ООН (ФАО) совместно с Международным Комитетом по Ирригации и Дренажу (МКИД) и Всемирной метеорологической организацией (ВМО). С мая 1990 года принят в качестве стандарта для определения эталонного суммарного испарения [10]. Формула Пенмана–Монтейна имеет следующий вид:

$$E = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}, \quad (1.5)$$

где E – суммарное суточное испарение, мм/сут;

R_n – чистая радиация на поверхности растений, МДж м⁻² сут⁻¹;

G – плотность теплового потока почвы, МДж м⁻² сут⁻¹;

T – среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м, °С;

u_2 – скорость ветра на высоте 2 м, м/с;

e_s – давление пара насыщения, кПа;

e_a – фактическое давление, кПа;

$(e_s - e_a)$ – дефицит давления пара насыщения, кПа;

Δ – уклон кривой давления пара, кПа $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

γ – психрометрическая постоянная, кПа $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Данный метод очень трудоемкий с точки зрения получения большого числа суточных метеорологических характеристик, измеренных на высоте 2 м (или преобразованных для этой высоты). Для получения суммарного испарения за год необходимо рассчитывать и суммировать суточные испарения.

1.4 Совместная база данных по стоку и испарению

Разделы 1.2 и 1.3 посвящены рассмотрению процесса формирования рядов стока и испарения, в результате которого получено, что: а) период наблюдений начинается с 1951 года и заканчивается 1990 годом, такие временные пределы связаны с ограничениями по рядам осадков и температуры; б) площадь водосборов меняется от 1000 до 50 000 км 2 .

Следует отметить, что начиная примерно с конца 80-х годов, наблюдается изменение климата [11], особенно заметное на Африканском континенте, которое может приводить к появлению неоднородных (нестационарных) рядов наблюдений за гидрометеорологическими величинами. Статистическая оценка нестационарных рядов в гидрологии пока не принята к использованию в нормативных документах, поэтому ограничение рядов 1990 годов оказалось вполне обоснованным.

Ряды стока и испарения были проверены на однородность (таблица 1.2), были построены разностно-интегральные кривые (для примера рисунок 1.7 и остальные кривые в Приложении Б) и были рассчитаны статистические характеристики (таблицы 1.3 и 1.4).

В Приложении А представлены хронологические графики стока и испарения, на некоторых из которых при визуальной оценке видны тренды, ко-

которые являются статистически незначимыми, как показано в таблице 1.2: неоднородных рядов по среднему на 5 % уровне значимости (оценка ряда по критерию Стьюдента) нет.

В Приложении А приведены также совместные РИК для стока и испарения. Следует отметить, что РИК испарения имеют синхронный ход водности со стоком, т. е. при наступлении маловодного периоды для стока наблюдается маловодная фаза и у испарения. Данная закономерность, с одной стороны, противоречит теоретическим идеям, рассмотренным в работах [12, 13], в которых рассматривается конкурентный тип взаимодействия стока и испарения за ресурс осадки. Но с другой стороны, если сток берет большую часть от ресурса (осадков), оставляя меньшую испарению, это не значит, что испарение переживает маловодный период. Надо смотреть какие ресурсы подаются стоку и испарению: если значения осадков большие, то разделение их на сток и испарение также дает большие величины (для Африки не учитываем изменение суммарных влагозапасов, так как они не оказывают существенного влияния на водный баланс речных бассейнов из-за специфики климатических и физико-географических условий). Для подтверждения последнего предположения в Приложении В показаны разностно-интегральные кривые для осадков и температуры. РИК осадков имеют синхронный ход со стоком и испарением, в отличие от РИК температуры, которые могут иметь и синхронный ход, и асинхронный. Температура может служить только косвенным показателем водности, который напрямую не характеризует водный баланс водосбора.

Таблица 1.2 – Оценка рядов стока и испарения на однородность на различных уровнях значимости (у.з.)

| Код поста | по критерию Фишера | | | по критерию Стьюдента | | |
|--------------------|--------------------|-------------|--------------|-----------------------|-------------|--------------|
| | 1 % у.з. | 5 % у.з. | 10 % у.з. | 1 % у.з. | 5 % у.з. | 10 % у.з. |
| Оценка рядов стока | | | | | | |
| 1634550 | + | + | + | + | + | + |
| 1634100 | + | + | + | + | + | + |

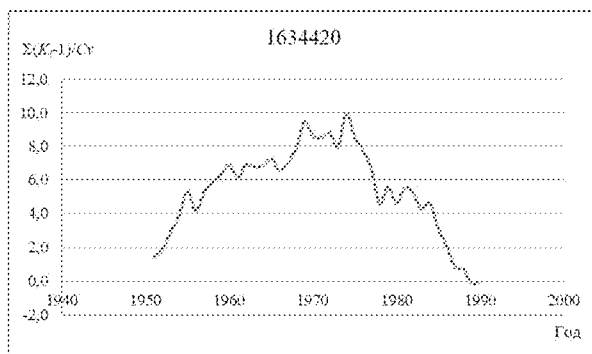
| Код поста | по критерию Фишера | | | по критерию Стьюдента | | |
|-----------|--------------------|-------------|--------------|-----------------------|-------------|--------------|
| | 1 % у.з. | 5 % у.з. | 10 % у.з. | 1 % у.з. | 5 % у.з. | 10 % у.з. |
| 1634200 | + | + | + | + | + | + |
| 1634500 | + | + | + | + | + | + |
| 1634420 | + | + | + | + | + | + |
| 1634400 | + | + | + | + | + | + |
| 1634800 | + | + | + | + | + | + |
| 1734480 | + | + | + | + | + | + |
| 1726100 | + | + | + | + | + | + |
| 1734400 | + | + | + | + | + | + |
| 1734410 | + | + | + | + | + | + |
| 1732100 | + | + | + | + | + | + |
| 1731400 | + | + | + | + | + | + |
| 1733300 | + | + | + | + | + | + |
| 1733600 | + | + | + | + | + | + |
| 1434780 | + | + | + | + | + | + |
| 1530100 | + | + | + | + | + | + |
| 1134040 | + | + | + | + | + | + |
| 1112200 | + | + | + | + | + | + |
| 1928745 | + | + | + | + | + | + |
| 1931370 | + | + | + | + | + | + |
| 1234680 | + | + | + | + | + | + |
| 1234120 | + | + | + | + | + | + |
| 1234050 | + | + | + | + | + | + |
| 1234130 | + | + | + | + | + | + |
| 1234080 | + | + | + | + | + | + |
| 1337251 | + | + | + | + | + | + |
| 1337151 | + | + | + | + | + | + |
| 1337100 | + | + | + | + | + | + |
| 1338271 | + | + | + | + | + | + |
| 1338401 | + | + | + | + | + | + |
| 1338200 | + | + | + | + | + | + |
| 1348100 | + | + | + | + | + | + |
| 1339012 | + | + | + | + | + | + |
| 1336500 | + | + | + | + | + | + |
| 1337200 | + | + | + | + | + | + |
| 1339011 | + | + | + | + | + | + |
| 1348151 | + | + | + | + | + | + |
| 1338201 | + | + | + | + | + | + |
| 1339015 | + | + | + | + | + | + |
| 1340500 | + | + | + | + | + | + |
| 1339017 | + | - | - | + | + | + |

| Код поста | по критерию Фишера | | | по критерию Стьюдента | | |
|------------------------|--------------------|-------------|--------------|-----------------------|-------------|--------------|
| | 1 % у.з. | 5 % у.з. | 10 % у.з. | 1 % у.з. | 5 % у.з. | 10 % у.з. |
| 1348152 | + | + | + | + | + | + |
| 1338600 | + | + | + | + | + | + |
| 1338300 | + | + | + | + | + | + |
| 1537180 | + | + | + | + | + | + |
| Оценка рядов испарения | | | | | | |
| 1634550 | + | + | + | + | + | + |
| 1634100 | + | + | + | + | + | + |
| 1634200 | + | + | – | + | + | + |
| 1634500 | + | + | + | + | + | + |
| 1634420 | + | + | + | + | + | + |
| 1634400 | + | + | + | + | + | + |
| 1634800 | + | + | + | + | + | + |
| 1734480 | + | + | + | + | + | + |
| 1726100 | + | + | – | + | + | + |
| 1734400 | + | + | + | + | + | + |
| 1734410 | + | + | + | + | + | + |
| 1732100 | + | + | – | + | + | + |
| 1731400 | + | + | + | + | + | + |
| 1733300 | + | + | + | + | + | + |
| 1733600 | + | + | + | + | + | + |
| 1434780 | + | + | + | + | + | + |
| 1530100 | + | + | + | + | + | + |
| 1134040 | + | + | + | + | + | + |
| 1112200 | + | + | – | + | + | + |
| 1928745 | + | + | + | + | + | + |
| 1931370 | + | + | + | + | + | + |
| 1234680 | + | + | + | + | + | + |
| 1234120 | + | + | + | + | + | + |
| 1234050 | + | + | + | + | + | + |
| 1234130 | + | + | + | + | + | + |
| 1234080 | + | + | + | + | + | + |
| 1337251 | + | + | + | + | + | + |
| 1337151 | + | + | + | + | + | + |
| 1337100 | + | + | + | + | + | + |
| 1338271 | + | + | + | + | + | + |
| 1338401 | + | + | + | + | + | + |
| 1338200 | + | + | + | + | + | + |
| 1348100 | + | + | + | + | + | + |
| 1339012 | + | + | + | + | + | + |
| 1336500 | + | + | – | + | + | + |

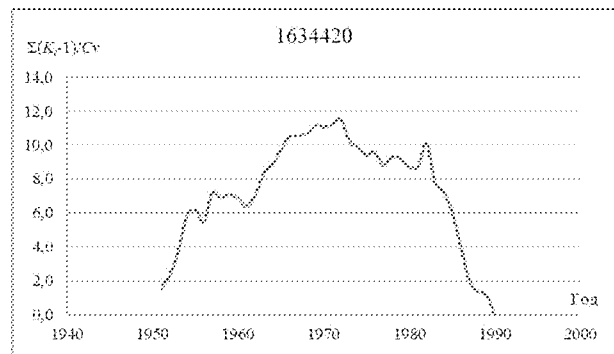
| Код поста | по критерию Фишера | | | по критерию Стьюдента | | |
|-----------|--------------------|-------------|--------------|-----------------------|-------------|--------------|
| | 1 % у.з. | 5 % у.з. | 10 % у.з. | 1 % у.з. | 5 % у.з. | 10 % у.з. |
| 1337200 | + | — | — | + | + | + |
| 1339011 | + | + | + | + | + | + |
| 1348151 | + | + | + | + | + | + |
| 1338201 | + | + | + | + | + | + |
| 1339015 | + | + | + | + | + | + |
| 1340500 | + | + | + | + | + | + |
| 1339017 | + | + | — | + | + | + |
| 1348152 | + | + | + | + | + | + |
| 1338600 | + | + | + | + | + | + |
| 1338300 | + | + | + | + | + | + |
| 1537180 | + | + | + | + | + | + |

В таблице 1.2 при оценке однородности взято несколько уровней значимости, хотя в гидрологической практике наиболее часто используются уровни значимости 5 и 10 % [14].

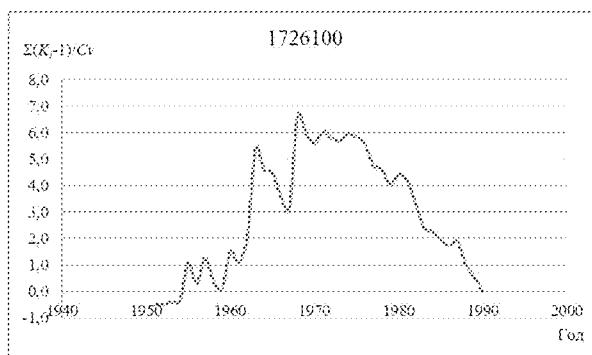
а)



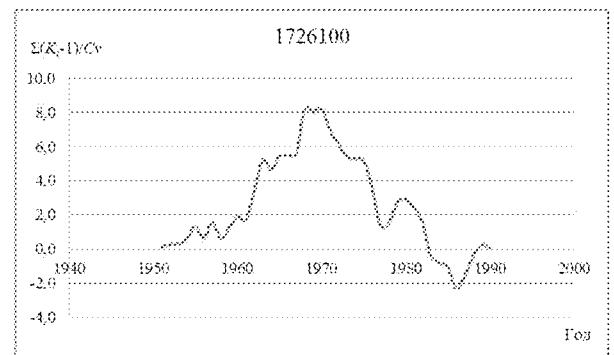
б)



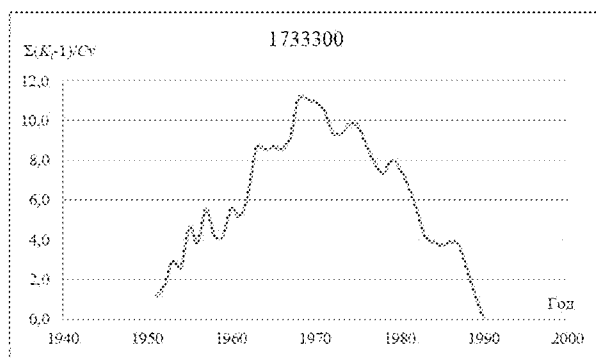
в)



г)



д)



е)

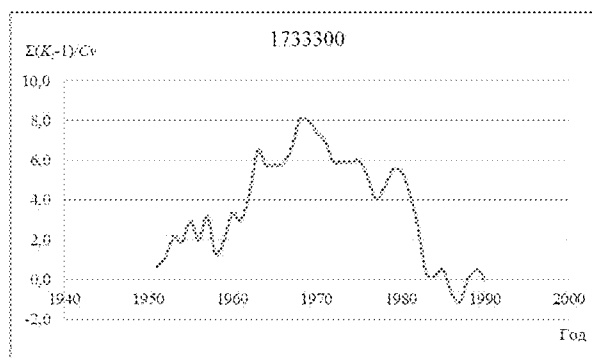


Рисунок 1.7 – Пример разностно-интегральных кривых для рядов стока (a, b , d) и испарения (z, e , e).

В таблицах 1.3 и 1.4 представлены рассчитанные статистические характеристики для рядов стока и испарения: норма (h, E), среднеквадратичное отклонение (σ), дисперсия (D), коэффициенты вариации (Cv), асимметрии (Cs) и эксцесса (Ek), а также начальные (второй a_2 , третий a_3 , четвертый a_4) и центральные (третий m_3 , четвертый m_4) моменты. Буквой N в таблице обозначена длина ряда.

Начальные и центральные моменты рассчитывались соответственно по формулам:

$$a_s = M[X^s], \quad (1.6)$$

$$m_s = M[(X - m_X)^s], \quad (1.7)$$

где M – оператор математического ожидания;

s – порядок момента;

m_X – среднее значение ряда случайных величин X .

По формулам (1.6) и (1.7) видно, что первый начальный момент соответствует среднему значению ряда, а второй центральный момент – дисперсии.

Коэффициент вариации Cv рассчитывался по формуле:

$$Cv = \frac{\sigma_x}{m_x}, \quad (1.8)$$

$$Cv = \sqrt{\frac{\sum(K_i - 1)^2}{n - 1}}, \quad (1.9)$$

где σ_x – среднеквадратическое отклонение;

m_x – среднее значение ряда, м³/с;

K_i – модульный коэффициент;

n – продолжительность ряда наблюдений, годы.

Коэффициент вариации характеризует меру относительного разброса случайной величины, показывает, какую долю среднего значения этой величины составляет ее средний разброс. В отличие от среднеквадратического или стандартного отклонения измеряет не абсолютную, а относительную меру разброса значений признака в статистической совокупности. По мнению автора рассматриваемого коэффициента К. Пирсона [15] – коэффициент вариации эффективнее абсолютного показателя вариации.

На рисунке 1.8, *а* показано влияние коэффициента вариации на форму функции плотности вероятности.

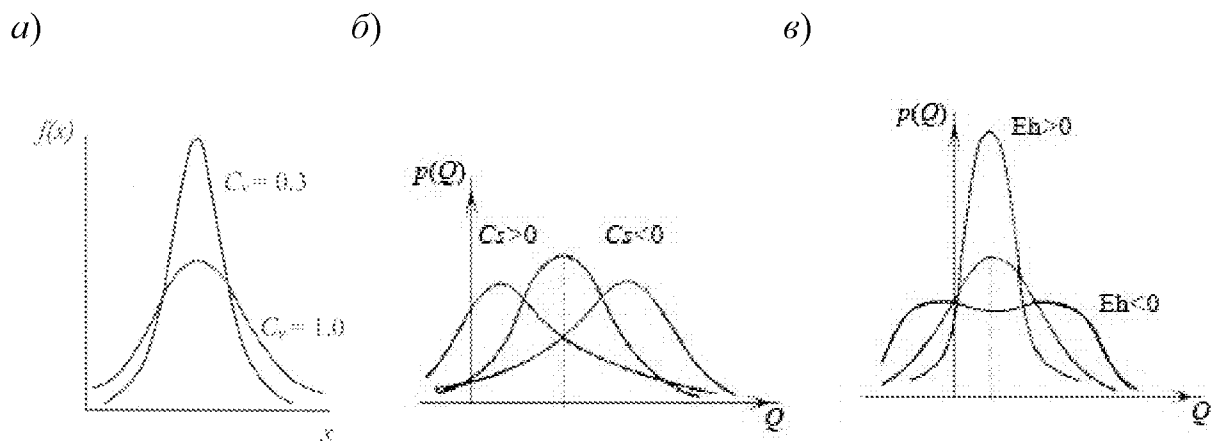


Рисунок 1.8 – Распределение плотности вероятности в зависимости от коэффициента вариации (*а*), коэффициента асимметрии (*б*) и эксцесса (*в*).

Коэффициент асимметрии C_s – величина, характеризующая асимметрию распределения данной случайной величины:

$$C_s = \frac{n \sum (K_i - 1)^3}{(n-1)(n-2)Cv^3}, \quad (1.10)$$

$$C_s = \frac{m_3}{\sigma^3}, \quad (1.11)$$

где K_i – модульный коэффициент;

n – продолжительность ряда наблюдения, годы;

m_3 – центральный момент третьего порядка.

На рисунке 1.8, б показано влияние коэффициента асимметрии на плотность вероятности.

Коэффициент эксцесса показывает степень крутости эмпирического распределения по отношению к нормальному. Он определялся по формуле:

$$Eh = \frac{m_4}{\sigma^4} - 3, \quad (1.12)$$

где m_4 – центральный момент четвертого порядка.

На рисунке 1.8, в показано влияние эксцесса на форму кривой распределения.

Когда распределение островершинное по отношению к нормальному, эксцесс будет положительным, если плосковершинное – отрицательным. Для нормального распределения $Eh \approx 0$.

Таблица 1.3 – Статистические характеристики рядов слоя стока

| Код поста | N, ГОД | h, мм | σ, мм | D, мм ² | Cv | Cs | Eh | Начальные моменты | | | Центральные моменты | | |
|-----------|--------|-------|-------|--------------------|------|-------|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| | | | | | | | | a ₂ , мм ² | a ₃ , мм ³ | a ₄ , мм ⁴ | m ₃ , мм ³ | m ₄ , мм ⁴ | |
| 1634550 | 39 | 1176 | 446 | 198830 | 0,38 | 1,72 | 4,93 | 1576761 | 2462514737 | 4551540937437 | 152542463 | 313578134822 | |
| 1634100 | 40 | 374 | 219 | 48090 | 0,59 | 1,11 | 1,33 | 186691 | 116561071 | 86389677984 | 11694133 | 10024727053 | |
| 1634200 | 40 | 904 | 247 | 61134 | 0,27 | 0,19 | -0,61 | 876662 | 902990117 | 978862386833 | 2808250 | 8920356745 | |
| 1634500 | 40 | 622 | 156 | 24465 | 0,25 | -0,07 | -0,83 | 410286 | 284437701 | 205272105994 | -267727 | 1300872745 | |
| 1634420 | 40 | 564 | 194 | 37526 | 0,34 | 0,00 | -1,02 | 355221 | 241832980 | 174298775723 | 13983 | 2792219189 | |
| 1634400 | 40 | 446 | 195 | 38203 | 0,44 | 1,03 | 1,95 | 235736 | 145919697 | 104718495887 | 7705431 | 7229891718 | |
| 1634800 | 40 | 413 | 125 | 15686 | 0,30 | 1,13 | 4,67 | 186238 | 91859818 | 50454974635 | 2211929 | 1888214468 | |
| 1734480 | 40 | 116 | 91 | 8278 | 0,78 | 1,11 | 0,87 | 21555 | 5216056 | 1489551466 | 838716 | 265220748 | |
| 1726100 | 40 | 88 | 97 | 9452 | 1,10 | 2,16 | 4,79 | 17029 | 5116024 | 1890052626 | 1981485 | 696314917 | |
| 1734400 | 39 | 153 | 97 | 9328 | 0,63 | 1,27 | 1,34 | 32428 | 8878409 | 2895830536 | 1147146 | 377308146 | |
| 1734410 | 40 | 100 | 53 | 2810 | 0,53 | 0,23 | -0,66 | 12829 | 1873942 | 300127079 | 34913 | 18449487 | |
| 1732100 | 39 | 171 | 171 | 29395 | 1,00 | 3,48 | 14,9 | 58016 | 37276983 | 33395851812 | 17515977 | 15476840676 | |
| 1731400 | 37 | 101 | 81 | 6636 | 0,81 | 2,70 | 9,35 | 16662 | 4449639 | 1633971113 | 1461967 | 543749317 | |
| 1733300 | 40 | 141 | 101 | 10289 | 0,72 | 0,63 | -0,47 | 30048 | 7751519 | 2247733664 | 661721 | 267798663 | |
| 1733600 | 40 | 125 | 97 | 9343 | 0,77 | 1,77 | 4,67 | 24682 | 6953626 | 2562122341 | 1600136 | 669806347 | |
| 1434780 | 39 | 571 | 194 | 37796 | 0,34 | 1,96 | 4,34 | 362757 | 263550659 | 221616344931 | 14402699 | 10478127056 | |
| 1530100 | 34 | 288 | 50 | 2540 | 0,17 | 0,13 | 3,01 | 85680 | 26155498 | 8214125948 | 17236 | 38765492 | |
| 1134040 | 40 | 292 | 183 | 33649 | 0,63 | 1,16 | 2,15 | 118347 | 60948894 | 38342815670 | 7144945 | 5828856555 | |
| 1112200 | 40 | 263 | 151 | 22803 | 0,57 | 0,49 | -0,56 | 91421 | 37437790 | 17067931581 | 1694686 | 1268402622 | |

| Код поста | N, ГОД | h, ММ | σ, ММ | D, ММ ² | Cv | Cs | Eh | Начальные моменты | | | Центральные моменты | | |
|-----------|--------|-------|-------|--------------------|------|-------|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| | | | | | | | | a ₂ , ММ ² | a ₃ , ММ ³ | a ₄ , ММ ⁴ | m ₃ , ММ ³ | m ₄ , ММ ⁴ | |
| 1928745 | 39 | 135 | 80 | 6368 | 0,59 | 0,56 | -0,73 | 24421 | 5256479 | 1256042223 | 285506 | 91897164 | |
| 1931370 | 40 | 30 | 13 | 176 | 0,44 | 0,13 | -0,38 | 1064 | 42315 | 1830578 | 298 | 81008 | |
| 1234680 | 39 | 38 | 23 | 515 | 0,60 | 1,24 | 1,96 | 1916 | 124277 | 9753827 | 14485 | 1317838 | |
| 1234120 | 39 | 25 | 14 | 191 | 0,55 | 0,26 | -0,61 | 821 | 30769 | 1269037 | 682 | 87182 | |
| 1234050 | 39 | 42 | 21 | 424 | 0,50 | 1,45 | 3,16 | 2136 | 135658 | 10456977 | 12699 | 1109394 | |
| 1234130 | 39 | 21 | 12 | 143 | 0,58 | -0,07 | -1,38 | 568 | 17403 | 565239 | -119 | 33271 | |
| 1234080 | 39 | 6 | 4 | 19 | 0,70 | 2,34 | 5,45 | 58 | 787 | 13806 | 194 | 3053 | |
| 1337251 | 30 | 194 | 121 | 14530 | 0,62 | 2,81 | 7,40 | 51588 | 20357969 | 10582362169 | 4919322 | 2196397495 | |
| 1337151 | 30 | 513 | 70 | 4950 | 0,14 | -0,47 | -0,36 | 268381 | 142540036 | 76777549547 | -164600 | 64714942 | |
| 1337100 | 30 | 668 | 146 | 21356 | 0,22 | -1,21 | 1,66 | 466776 | 335560603 | 246287302784 | -3791533 | 2123452976 | |
| 1338271 | 30 | 353 | 86 | 7462 | 0,24 | -0,91 | -0,11 | 132128 | 51210950 | 20342010574 | -586129 | 160752607 | |
| 1338401 | 30 | 752 | 123 | 15230 | 0,16 | -0,45 | -0,80 | 580900 | 458405943 | 368532271829 | -846991 | 511141944 | |
| 1338200 | 31 | 691 | 114 | 13069 | 0,17 | -0,67 | 0,24 | 490348 | 355396548 | 262252056997 | -994307 | 553423127 | |
| 1348100 | 30 | 386 | 88 | 7832 | 0,23 | 0,39 | -1,13 | 156357 | 66423064 | 29429116340 | 271092 | 114867101 | |
| 1339012 | 30 | 324 | 81 | 6624 | 0,25 | -1,11 | 1,46 | 111206 | 39546575 | 14428339363 | -600384 | 195627063 | |
| 1336500 | 30 | 2732 | 651 | 423287 | 0,24 | -0,52 | 1,06 | 7873271 | 23602763935 | 73200716724464 | - | 727969464820 | |
| 1337200 | 30 | 467 | 105 | 10960 | 0,22 | 0,70 | 0,67 | 229013 | 117736633 | 63533932196 | 803842 | 440276474 | |
| 1339011 | 30 | 333 | 73 | 5295 | 0,22 | -1,12 | 2,01 | 115981 | 41593673 | 15260381244 | -431872 | 140364564 | |
| 1348151 | 30 | 422 | 50 | 2451 | 0,12 | 0,43 | -0,84 | 180214 | 78049516 | 34257937720 | 52326 | 12995627 | |
| 1338201 | 30 | 506 | 66 | 4414 | 0,13 | 0,75 | 0,71 | 260084 | 136081996 | 72508110547 | 219645 | 72341448 | |

| Код поста | N, ГОД | h, ММ | σ, ММ | D ₂ , ММ ² | Cv | Cs | Eh | Начальные моменты | | | Центральные моменты | | |
|-----------|--------|-------|-------|----------------------------------|------|-------|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | | | | | | | | a ₂ , ММ ² | a ₃ , ММ ³ | a ₄ , ММ ⁴ | m ₃ , ММ ³ | m ₄ , ММ ⁴ | m ₄ , ММ ⁴ |
| 1339015 | 30 | 393 | 89 | 7907 | 0,23 | -0,91 | 2,08 | 162166 | 69115727 | 30275671140 | -639589 | 317879011 | |
| 1340500 | 30 | 468 | 104 | 10797 | 0,22 | 0,16 | -0,73 | 229627 | 117462150 | 62377545477 | 183165 | 264073939 | |
| 1339017 | 30 | 435 | 139 | 19191 | 0,32 | -0,08 | -0,25 | 207744 | 106293929 | 57506744167 | -205222 | 1011229421 | |
| 1348152 | 30 | 362 | 52 | 2718 | 0,14 | 0,35 | -0,65 | 133316 | 50143668 | 19228289475 | 49290 | 17339973 | |
| 1338600 | 30 | 620 | 113 | 12666 | 0,18 | -0,04 | -0,39 | 396471 | 260874875 | 176124229536 | -61444 | 4187933303 | |
| 1338300 | 30 | 520 | 110 | 12174 | 0,21 | -1,05 | 2,45 | 282453 | 157786630 | 90253427425 | -1411264 | 807750220 | |
| 1537180 | 40 | 393 | 138 | 18944 | 0,35 | -0,81 | 0,15 | 173192 | 80549319 | 38901698422 | -2105920 | 1129614294 | |

Таблица 1.4 – Статистические характеристики рядов испарения

| Код поста | N, ГОД | E, ММ | σ, ММ | D ₂ , ММ ² | Cv | Cs | Eh | Начальные моменты | | | Центральные моменты | | |
|-----------|--------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | | | | | | | | a ₂ , ММ ² | a ₃ , ММ ³ | a ₄ , ММ ⁴ | m ₃ , ММ ³ | m ₄ , ММ ⁴ | m ₄ , ММ ⁴ |
| 1634550 | 39 | 1106 | 69 | 4752 | 0,062 | 0,06 | -0,65 | 1589 | 78786 | 4622919 | 19615 | 53103422 | |
| 1634100 | 40 | 1264 | 66 | 4373 | 0,052 | -0,10 | -0,97 | 299 | 7460 | 221158 | -28189 | 38913671 | |
| 1634200 | 40 | 1262 | 49 | 2395 | 0,039 | -0,33 | -1,07 | 8934 | 929036 | 101668849 | -38912 | 11049692 | |
| 1634500 | 40 | 1104 | 113 | 12828 | 0,103 | 0,14 | -0,48 | 38266 | 8101785 | 1785615762 | 196664 | 415132756 | |
| 1634420 | 40 | 1185 | 85 | 7272 | 0,072 | -0,19 | -0,23 | 58379 | 16112264 | 4707775132 | -119666 | 146418342 | |
| 1634400 | 40 | 1233 | 61 | 3696 | 0,049 | -0,32 | -1,15 | 76975 | 27226999 | 11165320678 | -72887 | 25308848 | |
| 1634800 | 40 | 1125 | 88 | 7677 | 0,078 | -0,13 | -0,37 | 90019 | 30869263 | 11787948678 | -84553 | 154817544 | |
| 1734480 | 40 | 991 | 97 | 9378 | 0,098 | 0,01 | -0,64 | 33,9 | 326 | 3694 | 8207 | 207427833 | |

| Код поста | N, ГОД | E, ММ | σ, ММ | D, ММ ² | Cv | Cs | Eh | Начальные моменты | | | Центральные моменты | | |
|-----------|--------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| | | | | | | | | a ₂ , ММ ² | a ₃ , ММ ³ | a ₄ , ММ ⁴ | m ₃ , ММ ³ | m ₄ , ММ ⁴ | |
| 1726100 | 40 | 1003 | 112 | 12445 | 0,111 | 0,13 | 0,27 | 1228327 | 1369048907 | 1531568342678 | 175013 | 506500063 | |
| 1734400 | 39 | 1007 | 105 | 10938 | 0,104 | 0,01 | -0,42 | 1601749 | 2035226617 | 2592722148263 | 9244 | 308987095 | |
| 1734410 | 40 | 1006 | 104 | 10851 | 0,104 | 0,05 | -0,40 | 1594225 | 2017288746 | 2556231074991 | 56911 | 306113739 | |
| 1732100 | 39 | 1000 | 118 | 13832 | 0,118 | 0,16 | 0,55 | 1231348 | 1387235386 | 1578323429421 | 257831 | 679327501 | |
| 1731400 | 37 | 1058 | 113 | 12683 | 0,106 | -0,20 | -0,47 | 1412094 | 1690484368 | 2033384714664 | -286338 | 406580047 | |
| 1733300 | 40 | 991 | 126 | 15817 | 0,127 | -0,17 | -0,42 | 1523890 | 1887768086 | 2343806024294 | -332070 | 645422865 | |
| 1733600 | 40 | 996 | 117 | 13580 | 0,117 | -0,08 | -0,38 | 1272734 | 1448367354 | 1657451994944 | -132720 | 483110129 | |
| 1434780 | 39 | 1029 | 108 | 11616 | 0,105 | 0,04 | -0,51 | 990941 | 1000009413 | 1018029519114 | 53411 | 335483987 | |
| 1530100 | 34 | 1111 | 105 | 10933 | 0,094 | -0,62 | 2,04 | 1018921 | 1046897151 | 1088125202375 | -710636 | 602861705 | |
| 1134040 | 40 | 1128 | 102 | 10477 | 0,091 | -0,25 | -0,33 | 1025377 | 1054376757 | 1094888819123 | -267887 | 292892662 | |
| 1112200 | 40 | 1061 | 116 | 13453 | 0,109 | -0,11 | -0,82 | 1022313 | 1049633196 | 1088363281194 | -177864 | 394986200 | |
| 1928745 | 39 | 948 | 99 | 9838 | 0,105 | 0,33 | 0,59 | 1013186 | 1040247315 | 1081968360713 | 321837 | 347699315 | |
| 1931370 | 40 | 796 | 89 | 7902 | 0,112 | 0,09 | -0,51 | 1130733 | 1221610710 | 1332806081874 | 61262 | 155403235 | |
| 1234680 | 39 | 695 | 116 | 13535 | 0,167 | -0,12 | -0,75 | 996678 | 1017514463 | 1052990337710 | -187922 | 411772641 | |
| 1234120 | 39 | 565 | 111 | 12298 | 0,196 | 0,12 | -1,04 | 1005797 | 1028295970 | 1063973763202 | 169954 | 297083690 | |
| 1234050 | 39 | 529 | 111 | 12321 | 0,210 | 0,10 | -1,01 | 1070013 | 1124311751 | 1193285339161 | 132736 | 301964154 | |
| 1234130 | 39 | 695 | 118 | 13967 | 0,170 | -0,03 | -1,05 | 1245399 | 1406771654 | 1600760285762 | -41268 | 380012101 | |
| 1234080 | 39 | 446 | 102 | 10410 | 0,229 | 0,08 | -0,83 | 1282169 | 1468814147 | 1694906408427 | 82609 | 235091058 | |
| 1337251 | 30 | 835 | 53 | 2836 | 0,064 | -0,11 | -0,99 | 1139799 | 1237509998 | 1357721975295 | -16788 | 16130981 | |
| 1337151 | 30 | 1194 | 55 | 3044 | 0,046 | -1,27 | 1,99 | 908486 | 879837762 | 861290783620 | -214120 | 46253074 | |

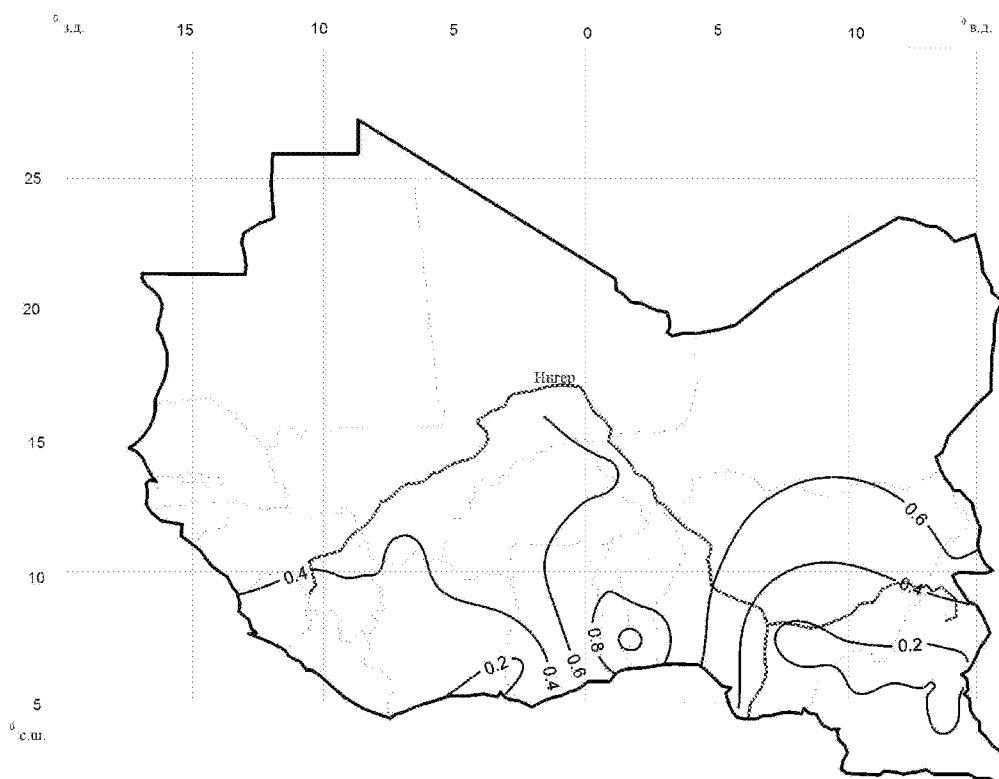
| Код поста | N, ГОД | E, ММ | σ, ММ | D, ММ ² | Cv | Cs | Eh | Начальные моменты | | | | Центральные моменты | |
|-----------|--------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| | | | | | | | | a ₂ , ММ ² | a ₃ , ММ ³ | a ₄ , ММ ⁴ | m ₃ , ММ ³ | m ₄ , ММ ⁴ | |
| 1337100 | 30 | 1119 | 43 | 1887 | 0,039 | 0,39 | -0,24 | 641314 | 522810342 | 431101278103 | 31793 | 9831147 | |
| 1338271 | 30 | 1029 | 49 | 2446 | 0,048 | -0,78 | -0,03 | 496639 | 363467579 | 271868290072 | -93925 | 17758996 | |
| 1338401 | 30 | 1060 | 43 | 1873 | 0,041 | -0,31 | -0,11 | 331353 | 200969968 | 125639453626 | -24749 | 10149895 | |
| 1338200 | 31 | 1180 | 37 | 1342 | 0,031 | -0,20 | -0,80 | 291927 | 167287602 | 99101948713 | -9888 | 3968402 | |
| 1348100 | 30 | 1072 | 41 | 1669 | 0,038 | -0,37 | -0,06 | 497232 | 364676793 | 273645573502 | -25396 | 8189059 | |
| 1339012 | 30 | 1054 | 45 | 2027 | 0,043 | -1,01 | 0,75 | 209355 | 102578699 | 52191724686 | -92146 | 15401302 | |
| 1336500 | 30 | 1270 | 34 | 1158 | 0,027 | -0,21 | -0,65 | 700503 | 589708462 | 498308347910 | -8134 | 3152618 | |
| 1337200 | 30 | 1099 | 48 | 2335 | 0,044 | -0,06 | -0,78 | 1427694 | 1710948253 | 2054094849020 | -7252 | 12111657 | |
| 1339011 | 30 | 1054 | 45 | 2027 | 0,043 | -1,01 | 0,74 | 1253170 | 1405953426 | 1579713330526 | -92151 | 15392292 | |
| 1348151 | 30 | 1061 | 43 | 1827 | 0,040 | -0,41 | 0,69 | 1061695 | 1097508891 | 1136838637255 | -32346 | 12307851 | |
| 1338201 | 30 | 1081 | 37 | 1364 | 0,034 | 0,20 | -0,50 | 1126253 | 1198090915 | 1276491695078 | 10147 | 4657192 | |
| 1339015 | 30 | 1099 | 42 | 1766 | 0,038 | -0,21 | 0,04 | 1393024 | 1646424773 | 1947701710476 | -15718 | 9464613 | |
| 1340500 | 30 | 1102 | 35 | 1229 | 0,032 | 0,11 | -1,07 | 1151234 | 1237792178 | 1332656769399 | 4910 | 2917222 | |
| 1339017 | 30 | 1057 | 42 | 1776 | 0,040 | -0,74 | 0,26 | 1112116 | 1175805691 | 1245124939025 | -55261 | 10281355 | |
| 1348152 | 30 | 1054 | 43 | 1876 | 0,041 | -0,42 | 0,53 | 1614278 | 2053132003 | 2613075947093 | -34013 | 12402955 | |
| 1338600 | 30 | 1108 | 38 | 1412 | 0,034 | 0,03 | -0,65 | 1209230 | 1333439877 | 1473109209434 | 1851 | 4684729 | |
| 1338300 | 30 | 1058 | 40 | 1570 | 0,037 | -0,38 | 0,32 | 1112331 | 1176147852 | 1245608417177 | -23497 | 8178703 | |
| 1537180 | 40 | 1067 | 42 | 1729 | 0,039 | 0,33 | 0,71 | 1128344 | 1201345036 | 1280989481490 | 23485 | 11077097 | |

Для визуальной оценки распределения статистических характеристик стока и испарения по территории Западной Африки были построены карты, которые показаны на рисунках 1.9, 1.10.

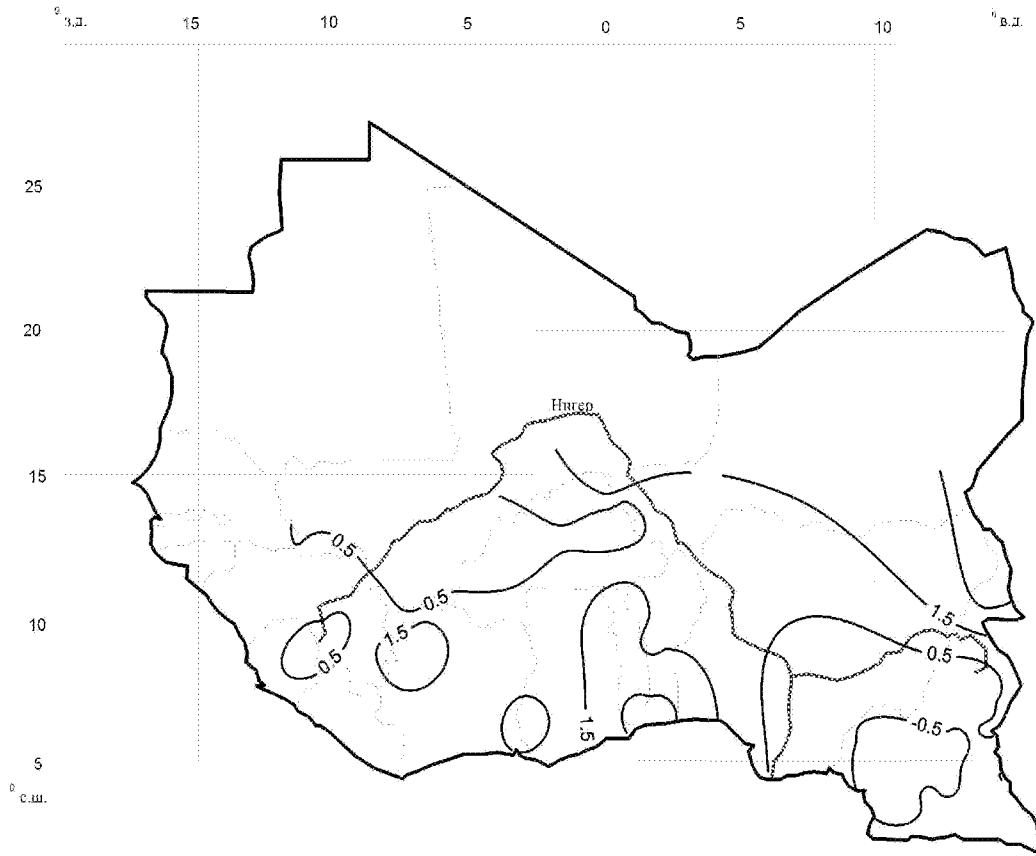
а)



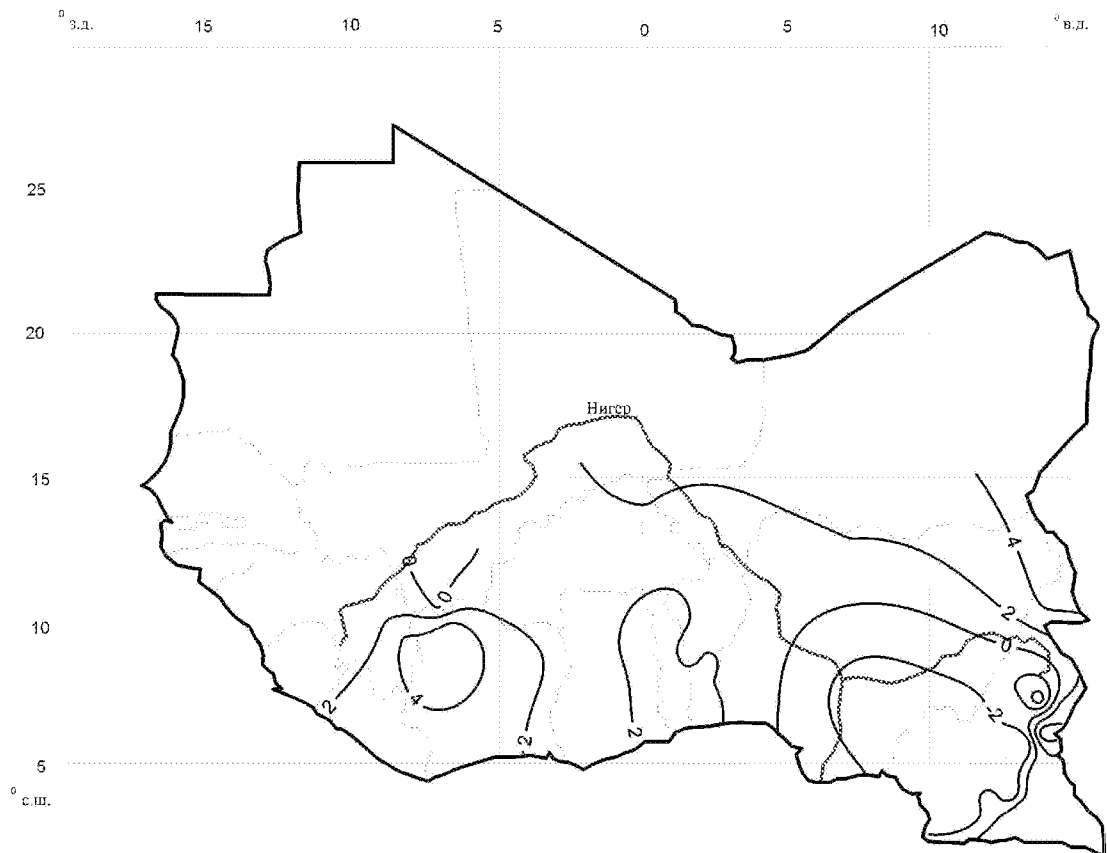
б)



б)



в)



д)



Рисунок 1.9 – Распределение по территории Западной Африки среднегогодового значения стока (*a*), коэффициентов вариации (*b*), асимметрии (*c*), соотношения этих коэффициентов (*d*) и коэффициента эксцесса (*d*).

На рисунке 1.9, *a* видно, что наибольшие значения слоя стока распределены на юго-востоке и юго-западе рассматриваемой территории, относятся к странам Нигерия, Камерун, Гвинея, Либерия, Сьерра-Леоне, Кот-Д'Ивуар. Максимальное значение достигает 2500 мм в год для бассейна нижнего течения р. Нигер.

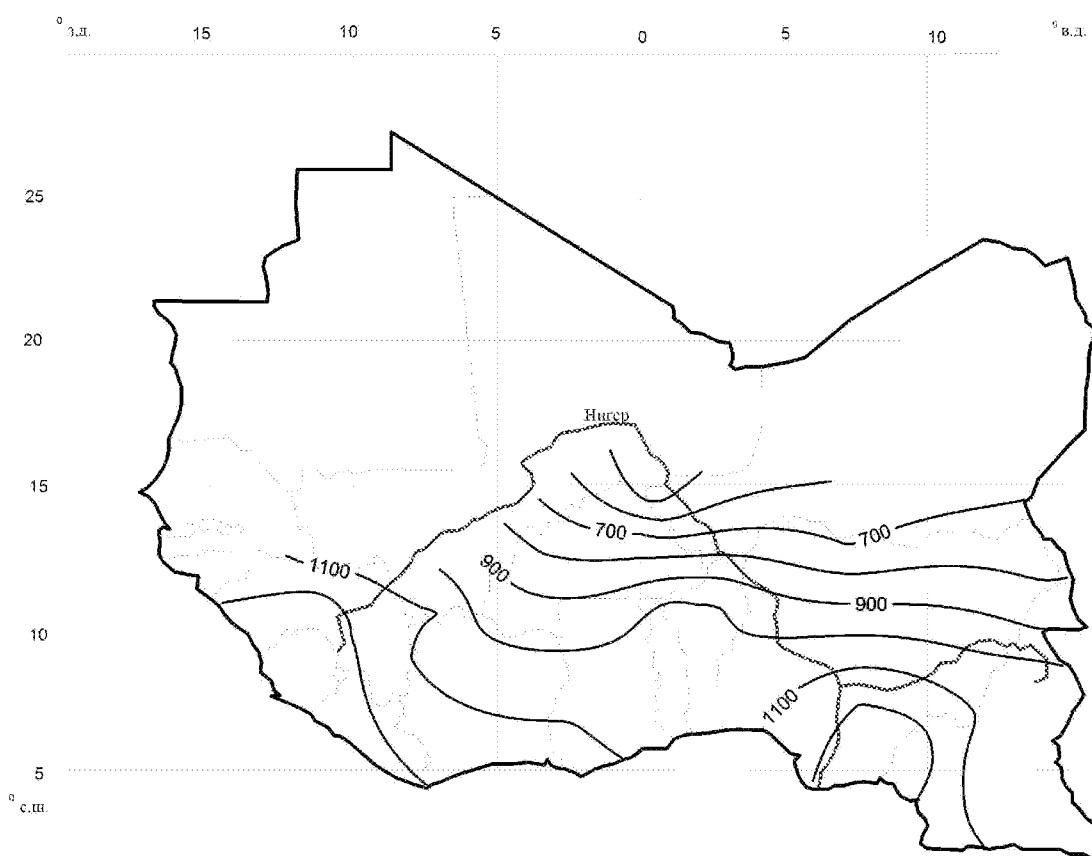
Распределение коэффициента вариации (рисунок 1.9, *b*) подчиняется общей закономерности: для больших значений стока меньшие значения коэффициента и наоборот, для малых значений – большие величины вариации.

Коэффициент асимметрии (рисунок 1.9, в) варьируется в среднем от $-0,5$ до $1,5$, причем отрицательные значения характерны для нижнего течения р. Нигер, примерно для тех же бассейнов, для которых свойственны большие величины стока. Это может быть связано с тем, что для этих районов характерны очень маловодные годы на многоводном фоне, т. е. присущ, так называемый, режим засух.

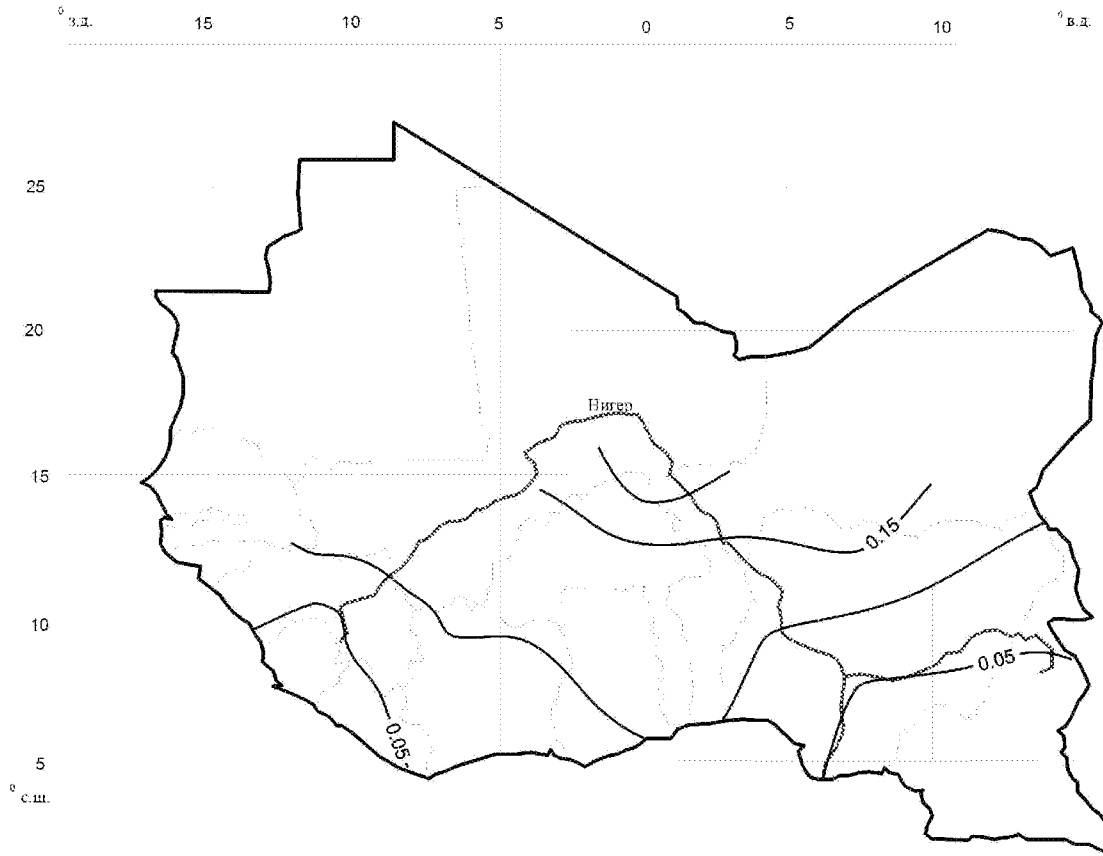
Соотношение коэффициентов асимметрии и вариации (рисунок 1.9, з) колеблется от -2 до 4 с преобладающим значением 2 .

Распределение коэффициента эксцесса (рисунок 1.9, д) говорит о том, что большинство кривых распределения плотности вероятности стока для Западной Африки является островершинными, т. е. коэффициент эксцесса больше нуля. Положительное значение эксцесса является косвенным признаком неустойчивости [13] решения модели формирования многолетнего стока, о которой речь пойдет в главе 2.

а)



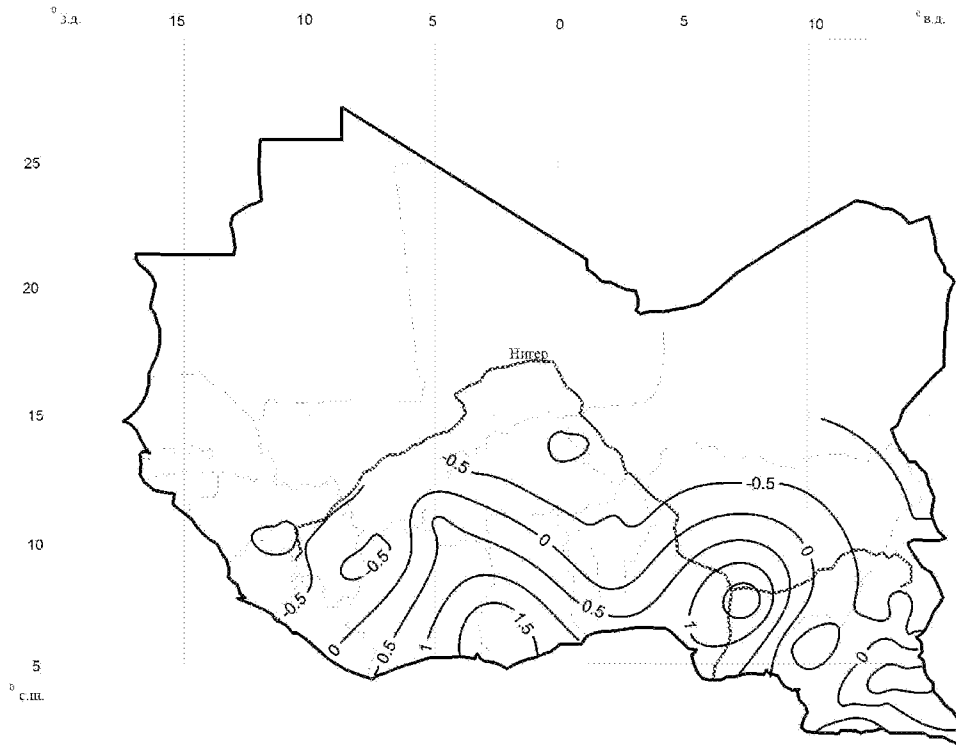
б)



в)



з)



д)



Рисунок 1.10 – Распределение по территории Западной Африки среднегогодового значения испарения (а), коэффициентов вариации (б), асимметрии (в), соотношения этих коэффициентов (з) и коэффициента эксцесса (д).

На рисунке 1.10, *а* показано распределение нормы испарения для территории Западной Африки. Значение испарения уменьшается к северу, к пустыне Сахара, на юге испарение достигает значений 1200 мм в год. Этот парадокс объясняется тем, что на юге осадков выпадает значительно больше, но доля испарения от выпавших осадков меньше, чем на севере.

Коэффициент вариации (рисунок 1.10, *б*) для испарения гораздо меньше, чем таковой для стока. Испарение более инерционная величина, не подверженная колебаниям с большими амплитудами. Среднее значение коэффициента вариации для рассматриваемой территории равняется 0,081. Коэффициент вариации увеличивается к северу и достигает 0,2.

Коэффициент асимметрии (рисунок 1.10, *в*) имеет положительные и отрицательные значения, причем последние сосредоточены в бассейне нижнего течения р. Нигер. Распределение коэффициента асимметрии испарения коррелирует с подобной картой для стока.

Соотношение коэффициентов асимметрии и вариации (рисунок 1.10, *г*) колеблется в среднем от $-0,5$ до $1,5$.

Значения коэффициента эксцесса (рисунок 1.10, *д*) варьируются в большом диапазоне от 5 до -25 . Закономерности в распределении не наблюдается, так как есть два водосбора, которые «сгущают» изолинии, имея экстремальные значения.

2 МНОГОМЕРНЫЕ КРИВЫЕ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ СТОКА И ИСПАРЕНИЯ ДЛЯ СУЩЕСТВУЮЩЕГО РЕЖИМА

2.1 Теоретические и эмпирические основания для перехода к использованию двумерных распределений

В разделе 2.1 в сжатом виде приводятся уже известные результаты, полученные на кафедре гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ сотрудниками африканскими аспирантами, защитившими кандидатские диссертации в последние годы. Их исследованиями обозначена проблемная ситуация, которая частично решается в данной работе.

Неустойчивость решений модели формирования речного стока

Все виды многолетнего речного стока описываются асимметричными одномодальными кривыми плотности вероятности, принадлежащими семейству кривых Пирсона и являющиеся решением одноименного уравнения

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1Q + b_2Q^2} p, \quad (2.1)$$

где p – плотность вероятности речного стока;
 a, b_0, b_1, b_2 – коэффициенты.

С практической точки зрения считается достаточным аппроксимировать кривую $p(Q)$ тремя начальными моментами $m_n = \int_{-\infty}^{\infty} Q^n p(Q) dQ$ ($n = 1, 2,$

3) (рисунок 2.1, а). Каждый из этих моментов имеет определенный геометрический смысл, и в совокупности они, с достаточной для практики полнотой, характеризуют одномодальную кривую. Одновременно следует заметить, что коэффициенты a, b_0, b_1, b_2 считаются в гидрологии «подгоночными» (их

варьируют, чтобы решение уравнения (2.1) соответствовало эмпирическому распределению).

На практике часто эмпирические кривые не соответствуют подобному описанию. Гистограммы часто многомодальные (рисунок 2.1, б), а «хвосты» распределений меняются не по экспоненте, а по степенному закону, рисунок 2.1, в. В инженерной гидрологии оба эти обстоятельства на практике игнорируют, ссылаясь на непродолжительность наблюдений.

Можно получить (и в теории марковских случайных процессов это уже сделано) генетическую модель формирования стока, которая дает решение в виде кривых плотности вероятности, эволюционирующих во времени:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q}(Ap) + 0,5 \frac{\partial^2}{\partial Q^2}(Bp). \quad (2.2)$$

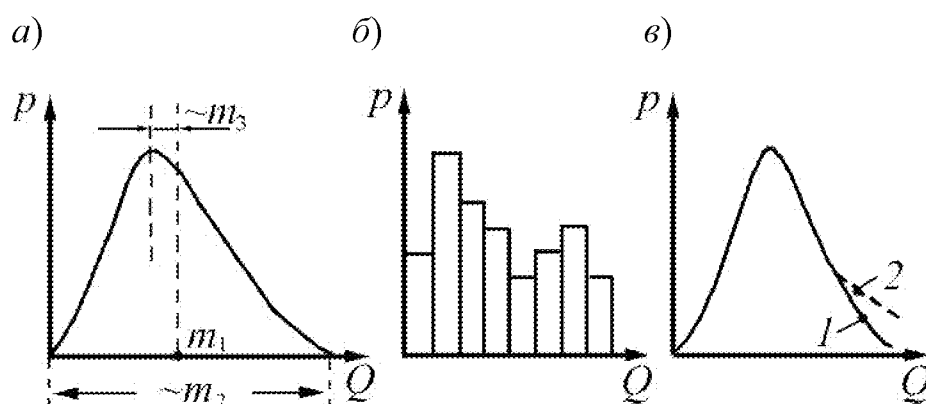


Рисунок 2.1 – Теоретическая (а) и реальные (б и в) распределения плотности вероятности (начальные моменты m_2 и m_3 характеризуют линейные размеры, показанные на рисунке): 1 – экспоненциальная; 2 – степенная [16].

Таким уравнением является уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК) (2.2), в котором A – коэффициент сноса, B – коэффициент диффузии.

В случае стационарных случайных процессов модель ФПК переходит в уравнение Пирсона (2.1), но его коэффициенты a , b_0 , b_1 , b_2 уже связываются с факторами формирования стока:

$$a = (G_{\tilde{c}\tilde{N}} + 2\bar{N}) / (2\bar{c} + G_{\tilde{c}});$$

$$b_0 = -G_{\tilde{N}} / (2\bar{c} + G_{\tilde{c}}); \quad b_1 = G_{\tilde{c}\tilde{N}} / (2\bar{c} + G_{\tilde{c}}); \quad b_2 = -G_{\tilde{c}} / (2\bar{c} + G_{\tilde{c}})$$

(здесь c – ко-

эффицент обратный коэффициенту стока; N – норма осадков; $G_{\bar{c}}$, $G_{\bar{N}}$, $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ – интенсивности белых шумов). Уравнение ФПК позволяет решить многие гидрологические проблемы, в том числе: а) оценить гидрологические последствия климатических изменений; б) оценить влияние антропогенных воздействий на водный режим бассейнов. И, главное, для наших целей, может объяснить появление толстых хвостов и неустойчивость моментов.

Это объяснение заключается в следующем [16]. Задание плотности вероятности (кривой обеспеченности) равносильно заданию определенного числа моментов: $p(Q) \sim m_1, m_2, m_3, \dots$. Применяется процедура (известная в науке), позволяющая аппроксимировать уравнение ФПК системой уравнений для начальных моментов m_n ($n = \overline{1,4}$):

$$\left\{ \begin{array}{l} dm_1/dt = -(\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}})m_1 - 0,5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}; \\ dm_2/dt = -2(\bar{c} - G_{\bar{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}}; \\ dm_3/dt = -3(\bar{c} - 1,5G_{\bar{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1; \\ dm_4/dt = -4(\bar{c} - 2G_{\bar{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2, \end{array} \right. \quad (2.3)$$

где $c = 1/(k\tau) = \bar{c} + \tilde{c}$; $\bar{N} = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$;

\bar{c} и \bar{N} – математические ожидания;

\tilde{c} и \tilde{N} – белые шумы с интенсивностями $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$;

k – коэффициент стока;

τ – время релаксации бассейна.

Из системы (2.3) видно, что при $\bar{c} < 0,5nG_{\bar{c}}$ производная $dm_n/dt > 0$, т. е. $m_n \rightarrow \infty$. Это стремление моментов к бесконечности и есть формальный признак неустойчивости решений. Неустойчивость для момента n -го порядка m_n возникает при $\beta = G_{\bar{c}}/\bar{c} > 2/n$ (m_3 : $\beta > 2/3$, m_2 : $\beta > 1$, m_1 : $\beta \rightarrow 2$). При

$G_{\bar{c}} \approx \bar{c}$ мультипликативная составляющая в системе (2.3) стремится к нулю и при сценарных оценках прогнозных моментов с использованием различных вариантов модели (2.3) производится деление на нуль (или близкое к нему значение), что недопустимо (или нежелательно). Неустойчивость указывает на то, что сток (или испарение) формируется по более сложной схеме, чем это следует из уравнения Пирсона, например, имеет место их взаимодействие. Учет последнего фактора требует перехода к двумерным распределениям.

Получена практическая формула для вычисления критерия неустойчивости:

$$\beta = 2k \ln(r) + 2, \quad (2.4)$$

где k – коэффициент стока;

r – коэффициент автокорреляции при годовой сдвижке.

По уравнению (2.4) были выявлены зоны неустойчивости для Западной Африки, которые показаны на рисунке 2.2 [17].

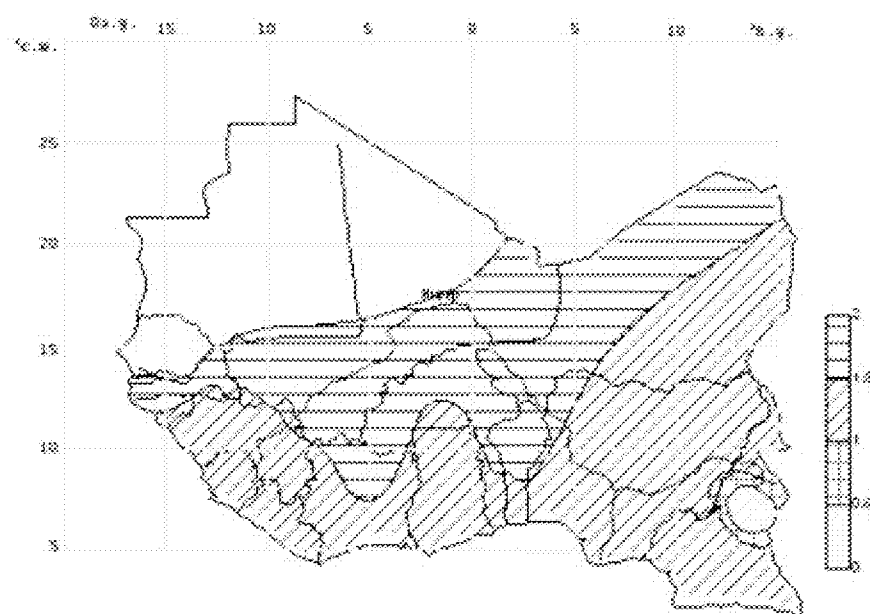


Рисунок 2.2 – Неустойчивость годового стока на территории Западной Африки: $\beta > 0,67$ – происходит потеря устойчивости третьим моментом; $\beta > 1$ – потеря устойчивости вторым моментом.

Расширение фазового пространства модели

Для преодоления данной проблемы в РГГМУ была разработана методология частично инфинитного моделирования [16, 18–25], которая включает в себя процедуру включения в модель формирования стока новых переменных (в нашем случае испарения), которые уменьшают (частично или полностью) мультипликативную составляющую шумов. Вместо одномерного уравнения ФПК применяется n -мерное

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\sum_{i=1}^n \frac{\partial(A_i p)}{\partial Y_i} + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial^2(B_{ij} p)}{\partial Y_i \partial Y_j}, \quad (2.5)$$

где p – плотность вероятности;

$$\vec{Y} = (Q, E);$$

A_i, B_{ij} – коэффициенты сноса и диффузии;

$$n = 2.$$

Устойчивость моментов в расширенной (за счет включения в уравнение испарения) модели ФПК (2.5) будет в случае [22]:

$$\operatorname{div} \vec{A} = \sum \partial A_i / \partial Q_i = -(\bar{c}_Q - 0,5G_{\tilde{c}_Q}) - (\bar{c}_E - 0,5G_{\tilde{c}_E}) < 0, \quad (2.6)$$

где \bar{c}_E и $G_{\tilde{c}_E}$ математическое ожидание и интенсивность шума мультипликативной составляющей модели испарения.

Из выражения (2.6) следует, что учет фазовой переменной в виде испарения увеличивает шансы на устойчивость. Чтобы проверить это утверждение (см. [22, 26, 27] выражение (2.6) было приведено к виду (с учетом того, что $\beta = G_{\tilde{c}} / \bar{c}$):

$$\operatorname{div} \vec{A} = -\bar{c}_Q(1 - 0,5\beta_Q) - \bar{c}_E(1 - 0,5\beta_E). \quad (2.7)$$

Результаты вычисления β_Q и β_E для ЕТР показали [27], что β_Q уменьшается с юга на север ($\beta_Q = 1,93$, р. Кума – ст-ца Александрийская, 44 °с.ш.; $\beta_Q = 0,25$, р. Пеза – д. Игумново, 66 °с.ш.), а β_E – увеличивается (для тех же бассейнов – с 0 до 0,87). Следовательно, каждая из переменных (Q и E) стабилизирует другую (тем в большей степени, чем неустойчивее последняя). Этот компенсационный механизм обеспечивает статистическую устойчивость совместных распределений стока и испарения.

Для обоснованного усложнения моделей формирования многолетнего стока Западной Африки необходимо проверить (помимо наличия зон неустойчивости по статистическим моментам) еще одно условия: наличие речных бассейнов с фрактальной размерностью больше 1 (размерность пространства вложения 2). Проверка проводилась методами фрактальной диагностики [28], результаты показаны на рисунке 2.3.

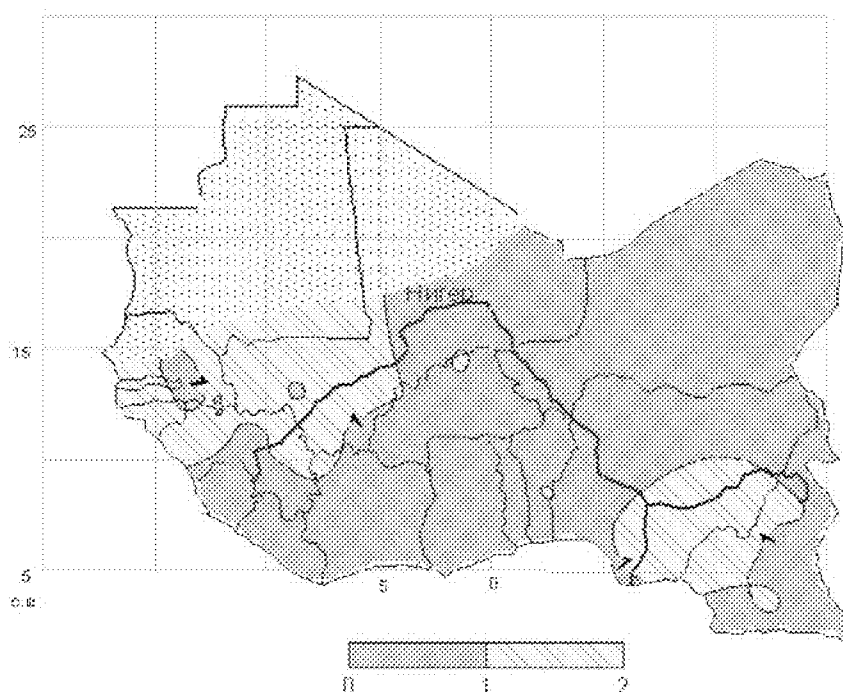


Рисунок 2.3 – Распределение размерности пространства вложения рядов годового стока по территории Западной Африки.

Таким образом, имеются все предпосылки для перехода к двумерному распределению плотности вероятности $p(Q, E)$.

2.2 Построение двумерных плотностей вероятности

2.2.1 Выбор инструментария для автоматизации обработки совместных рядов стока и испарения

Для автоматизации процессов обработки совместных рядов стока и испарения и построения эмпирических двумерных гистограмм и теоретических плотностей вероятности были проанализированы наиболее распространенные компьютерные приложения. В качестве рабочей среды была выбрана математическая лаборатория *MatLab*. Рассмотрим основные преимущества этой среды.

а) Система *MatLab* является открытой. Большинство команд и функций в ней реализовано в виде, так называемых, *m*-файлов на языке *C* и доступны для модификации. Пользователь может самостоятельно создавать не только функции, но и библиотеки файлов для реализации специфических задач.

б) Система *Matlab* имеет входной язык, похожий на смесь языков *C*, Бейсика, Фортрана и Паскаля. Создание программ в системе традиционно, поэтому привычно для большинства пользователей компьютеров. В отличие от *Mathcad*, в котором реализуется принцип задания задач в виде формул, *MatLab* «выигрывает» по скорости вычислений именно за счет возможности написания пользовательских программ. Язык программирования, лишенный некоторых синтаксических форм, например объявления функции, может быть освоен, как подсчитано, за 4 часа более-менее продвинутым программистом [29].

в) Имеются встроенные функции, реализующие построение графиков практически всех известных в науке и технике типов, начиная от гистограмм и заканчивая трехмерными поверхностями, с возможностью анимации.

г) Немаловажной особенностью системы *MatLab*, для целей данной диссертации, является ориентация ее на работу с массивами данных: все вы-

числительные операции в ней выполняются над векторами или наборами векторов. Система *Matlab* «по своей сути является эмулятором векторных вычислений, и это существенно отличает ее от других систем, таких, как *Mathcad*, *Maple*. Векторная обработка данных обеспечивает высокую скорость вычислений, избавляет пользователя от написания циклов и гарантирует непревзойденную точность.» [30].

д) В состав семейства *Matlab* входит подсистема моделирования динамических процессов *Simulink*. Для пользователя это конструктор, с помощью которого он может объединять блоки, соответствующие отдельным элементам динамической системы в единое целое и изучать их поведение во времени.

е) В состав системы *Matlab* входит ядро системы символьной математики (компьютерной алгебры) *Maple V Release 5*, благодаря чему есть возможность символьных и аналитических вычислений.

ж) Имеются встроенные пакеты прикладных программ, предназначенные, например, для аппроксимации и сглаживания экспериментальных данных, решения уравнений в частных производных, для безусловной и условной оптимизации, для статистической обработки данных.

Итак, система *Matlab* отличается, в частности от *MathCad* (математического калькулятора), быстродействием, имеет встроенное ядро *Maple*, простой язык программирования, средства визуализации и моделирования. В математическом пакете *Matlab* само моделирование и дальнейшее исследование моделей можно осуществить, по крайней мере, тремя способами: функциями из раздела системы *Toolbox*, использованием расширения пакета *Simulink* и непосредственно программированием.

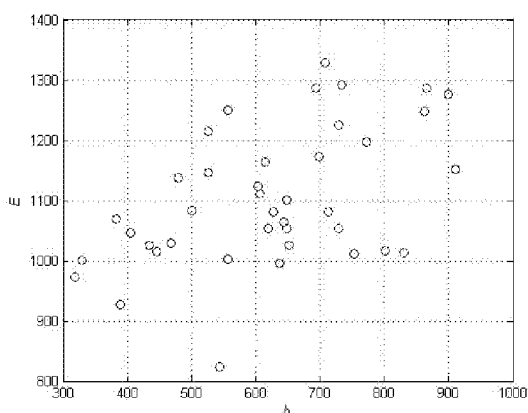
2.2.2 Алгоритм построения двумерной гистограммы

Алгоритм построения эмпирической двумерной гистограммы сводится к следующим шагам:

- по рядам слоя стока и испарения строится точечная зависимость (эллипс рассеивания) стока от испарения $Q = f(E)$;
- диапазон по стоку и испарению делится на равные интервалы;
- подсчитывается число точек в этих интервалах, которое заносится в таблицу;
- по таблице строится гистограмма.

Пример эллипса рассеивания и эмпирической гистограммы показан на рисунке 2.4.

а)



б)

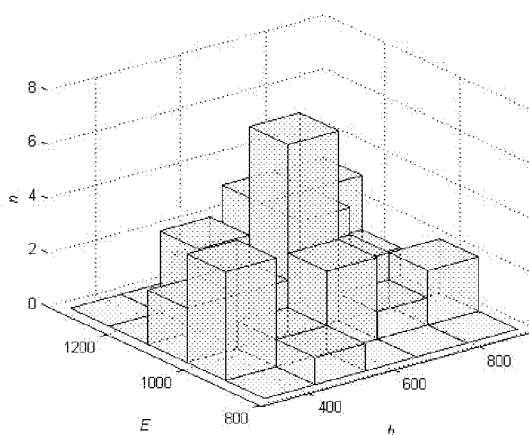


Рисунок 2.4 – Эллипс рассеивания (а), эмпирическая гистограмма (б),
р. Мило – ст. Канкан.

На рисунке 2.4, а видно, что эллипс рассеивания имеет ось наклона с левого нижнего к правому верхнему углу. Такую закономерность можно рассмотреть, хотя не столь очевидно, и на гистограмме (рисунок 2.4, б). Втянутость и наклон эллипса могут быть связаны с коэффициентами асимметрии рядов стока и испарения.

Для остальных водосборов эллипсы рассеивания и эмпирические гистограммы представлены в приложении Г.

2.2.3 Алгоритм построения двумерной поверхности плотности вероятности

В разделе 2.2.3 приведены сведения из работ [21–23, 31] посвященные наиболее приемлемому варианту аналитической аппроксимации двумерных распределений. А. К. Митропольский [31] предложил использовать так называемые распределения типа А, основанные на рядах Грамма–Шарлье, а В. В. Коваленко обосновал возможность использования двумерных распределений плотности вероятности стока и испарения, опираясь на многомерное уравнение ФПК.

При аналитической аппроксимации эмпирических гистограмм поверхностями плотности вероятности следует рассмотреть n -мерное уравнение [28]:

$$\partial p(\vec{x}, t) / \partial t = -\vec{\nabla}' [\vec{A}(\vec{x}, t) p(\vec{x}, t)] + 0,5 \text{Sp}[\vec{\nabla} \vec{\nabla}' \vec{B}(\vec{x}, t) p(\vec{x}, t)], \quad (2.8)$$

где \vec{x} – вектор, характеризующий фазовые переменные исходной системы динамических моделей; $\vec{\nabla} = |\partial / \partial \vec{x}|$; штрих и Sp означают операции транспонирования и взятия следа.

Соотношение (2.8) является уравнением неразрывности потока вероятности $\vec{\Pi}(\vec{x}, t) = \vec{A}(\vec{x}, t) p(\vec{x}, t) - 0,5 \text{div} \vec{B}(\vec{x}, t) p(\vec{x}, t)$, который для стационарного распределения ($\partial p(\vec{x}, t) / \partial t = 0$) является величиной постоянной, а учитывая, что на границах $p(\pm \infty, t) = 0$ – нулевой (на границах). Исходя из этого, получают уравнение [28]:

$$\vec{\nabla} [\vec{B}(\vec{x}, t) p(\vec{x}, t)] - 2 \vec{A}(\vec{x}, t) p(\vec{x}, t) = 0. \quad (2.9)$$

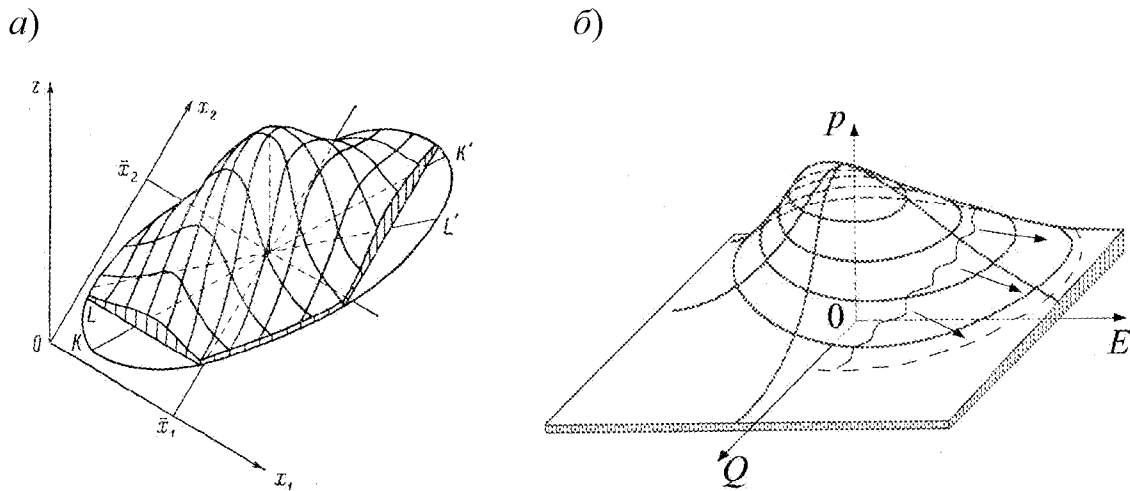


Рисунок 2.5 – Нормальная поверхность (а) и экстраполяция многомерного «хвоста» в зону малых обеспеченностей (б) [21].

«В отличие от одномерного распределения, для которого справедливо уравнение Пирсона, в многомерном случае возможны вихревые движения в потоке вероятности. Поэтому соотношение (2.9) справедливо при существовании скалярного поля для потенциала $V(\vec{x})$ » [21].

Уравнениями в частных производных первого порядка, подобными (2.9), описываются всевозможные поверхности. При отсутствии параметрических шумов их решением является n -мерное нормальное распределение (рисунок 2.5, а), эллипсоид рассеяния которого позволяет определять вероятность нахождения вектора \vec{x} внутри него.

В двумерном случае ($\vec{x} = (Q, E)$),

$$p(\vec{x}) = \frac{1}{2\pi\sigma_Q\sigma_E\sqrt{1-r_{QE}^2}} \exp(-\lambda^2). \quad (2.10)$$

Вероятность попадания вектора \vec{x} внутрь эллипса равных вероятностей равна $1 - e^{-\lambda^2}$, где

$$\frac{1}{2(1-r_{QE}^2)} \left[\frac{(Q-\bar{Q})^2}{\sigma_Q^2} - \frac{2r_{QE}(Q-\bar{Q})(E-\bar{E})}{\sigma_Q\sigma_E} + \frac{(E-\bar{E})^2}{\sigma_E^2} \right] = \lambda^2. \quad (2.11)$$

«В случае явного учета параметрических шумов решение уравнения (2.8) будет асимметричным (рисунок 2.5, б), и нужны определенные усилия, чтобы в полном виде проанализировать двумерный аналог уравнения Пирсона. Если ограничиться эмпирическими построениями, то первым шагом на пути перехода от нормальных многомерных распределений к асимметричным может быть использование так называемых распределений типа A , основанных на использовании ряда Грама-Шарлье, приводящего (в одномерном случае) к выражению:

$$p_A(x) = p(x) + \frac{r_3}{6} p^{(3)}(x) + \frac{r_4 - 3}{24} p^{(4)}(x), \quad (2.12)$$

где x – нормированная случайная величина;

r_3, r_4 – основные моменты ($r_3 = \mu_3 / \sigma^3, r_4 = \mu_4 / \sigma^4$).» [21].

Первый член $p(x)$ разложения (2.10) дает нормальное распределение, которое деформируется за счет учета асимметрии и эксцесса. Распределение (2.10) обобщается на двумерный случай [21]:

$$\begin{aligned} p_A(x, y) = & p(x) \left[p(y) - \frac{r_{0|3}}{6} p^{(3)}(y) + \frac{r_{0|4} - 3}{24} p^{(4)}(y) \right] + \\ & + p'(x) \left[-\frac{r_{1|2}}{2} p''(y) + \frac{r_{1|3} - 3r_{1|1}}{6} p^{(3)}(y) \right] + \\ & + p''(x) \left[-\frac{r_{2|1}}{6} p'(y) + \frac{r_{2|2} - 2r_{1|1}^2 - 1}{4} p''(y) \right] + \\ & + p^{(3)}(x) \left[-\frac{r_{3|0}}{6} p(y) + \frac{r_{3|1} - 3r_{1|1} - 1}{6} p'(y) \right] + p^{(4)}(x) \left[-\frac{r_{4|0} - 3}{24} p(y) \right] \quad (2.13) \end{aligned}$$

(здесь $r_{1|2}$ и т. д. – смешанные основные моменты), приводящий к асимметричному распределению типа, изображенного на рисунке 2.5, б.

При дальнейшей работе мы ограничимся применением формул (2.10) и (2.11). Поясним подобное ограничение.

В речном бассейне действует конкурентное взаимодействие между фазовыми переменными Q_i . Известно также, что для большого периода осреднения уравнение водного бассейна имеет вид $\dot{X} = \bar{Q} + \bar{E}$, т. е. остается только два конкурента (Q и E) за ресурс (X). Гидрологи интересуются в основном расходом воды. Стохастически обобщая динамическую модель $dQ/dt = -(1/k\tau)Q + \dot{X}/\tau$, они приходят к уравнению ФПК и семейству кривых Пирсона (его стационарному решению). Но аналогичное уравнение можно записать и для испарения [16]:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{k_E\tau_E}E + \frac{\dot{X}}{\tau_E}, \quad (2.14)$$

где $k_E = E/\dot{X}$ – коэффициент испарения;

τ_E – время релаксации испарительной емкости бассейна.

Стохастически обобщая это уравнение, выводится уравнение ФПК для $p(E)$ с коэффициентами сноса и диффузии:

$$A_E = -(\bar{c}_E - 0,5G_{\tilde{c}_E})E - 0,5G_{\tilde{c}_E\tilde{N}} + \bar{N}; \quad (2.15)$$

$$B_E = G_{\tilde{c}_E}E^2 - 2G_{\tilde{c}_E\tilde{N}}E + G_{\tilde{N}},$$

где $G_{\tilde{c}_E\tilde{N}}$ больше нуля, что приводит к отрицательному коэффициенту асимметрии для распределения $p(E)$.

Пока $G_{\tilde{c}_E} \ll \bar{c}_E$ и $\bar{c}_Q \gg G_{\tilde{c}_Q}$ сток и испарение могут рассматриваться независимо друг от друга, но в случае отсутствия стационарных распределений их следует рассматривать совместно. Так как

$c_Q = \dot{X}/Q = (Q + E)/Q$; $c_E = \dot{X}/E = (Q + E)/E$, то получается система уравнений:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q + E}{\tau_Q} + \frac{\dot{X}}{\tau_Q} + z\xi; \quad (2.16)$$

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{Q + E}{\tau_E} + \frac{\dot{X}}{\tau_E} + z\xi,$$

в которые добавлен аддитивный белый шум с интенсивностью G_z . Мультипликативные шумы исчезли, так как сделано предположение, что они порождались либо стоком, либо испарением. Таким образом, было получено [16, 19] двумерное уравнение ФПК:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p(Q, E; t)}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial Q} \left[\frac{1}{\tau_Q} (Q + E - \dot{X}) p(Q, E; t) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial E} \left[\frac{1}{\tau_E} (Q + E - \dot{X}) p(Q, E; t) \right] + \frac{G_z \partial^2 p(Q, E; t)}{\partial Q \partial E} + \\ & + \frac{G_z}{2} \frac{\partial^2 p(Q, E; t)}{\partial Q^2} + \frac{G_z}{2} \frac{\partial^2 p(Q, E; t)}{\partial E^2}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Решением этого уравнения является нормальное распределение («колокольчик») (рисунок 2.6, *a*) [16].

При объединении предметных областей произошла нормализация распределения, а также ликвидирован источник, делающий распределение неустойчивым. Получено устойчивое по моментам, но уже двумерное распределение. В случае одномерного устойчивого распределения необходимо было иметь три момента для его описания. Сечение же «колокольчика» будет уже нормальным распределением и для его описания надо знать два момента. Но это будет условное распределение, для каждого E – «свое».

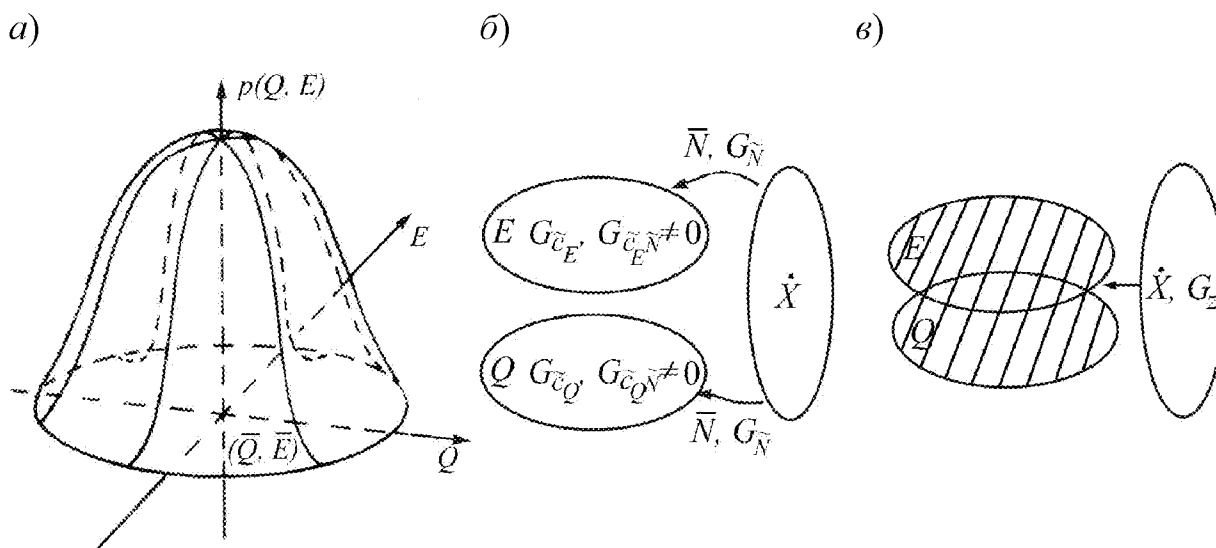


Рисунок 2.6 – Нормализация распределения $p(Q, E)$ при объединении двух предметных областей (а) и учитываемые интенсивности шумов при раздельном (б) и совместном (в) их рассмотрении [16].

Описание программного продукта по построению $p(Q, E)$

Для работы программы нужны ряды речного стока (расхода воды, слоя стока) и испарения. В качестве исходных данных могут выступать значения величин в любых размерностях, которые необходимы для конкретных целей.

Программа вызывается из командной строки (название функции `gudra`) после ввода исходной информации (рисунок 2.7).

Результаты работы программы представляются в виде трех графиков: эллипса рассеивания, эмпирической двумерной гистограммы и поверхности плотности вероятности. Пример работы представлен на рисунке 2.8. На поверхности вероятности нанесены точки двумерной вероятности, рассчитанные по рядам стока и испарения. Используя возможности среды *MatLab*, можно рассматривать графики с разных углов зрения (рисунок 2.9). Рисунок 2.9, б (вид сверху на поверхность плотности вероятности) соответствует эллипсу рассеивания.

```

MATLAB 7.4.0 (R2007a)
File Edit Debug Desktop Window Help
Shortcuts How to Add What's New
To get started, select MATLAB Help or Demos from the Help menu.
>> Q=[260
437
461
321
389
297
429
490
307
219
341
482
257
290
281
501
317
352
433
270
358
244
Start: Continue entering statement

```

```

MATLAB 7.4.0 (R2007a)
File Edit Debug Desktop Window Help
Shortcuts How to Add What's New
To get started, select MATLAB Help or Demos from the Help menu.
242
453
420
453
423
292
353
365
369
]:
>> E=[460
442
449
457
400
371
473
392
441
409
474
416
380
Start:

```

Рисунок 2.7 – Исходные данные для программы.

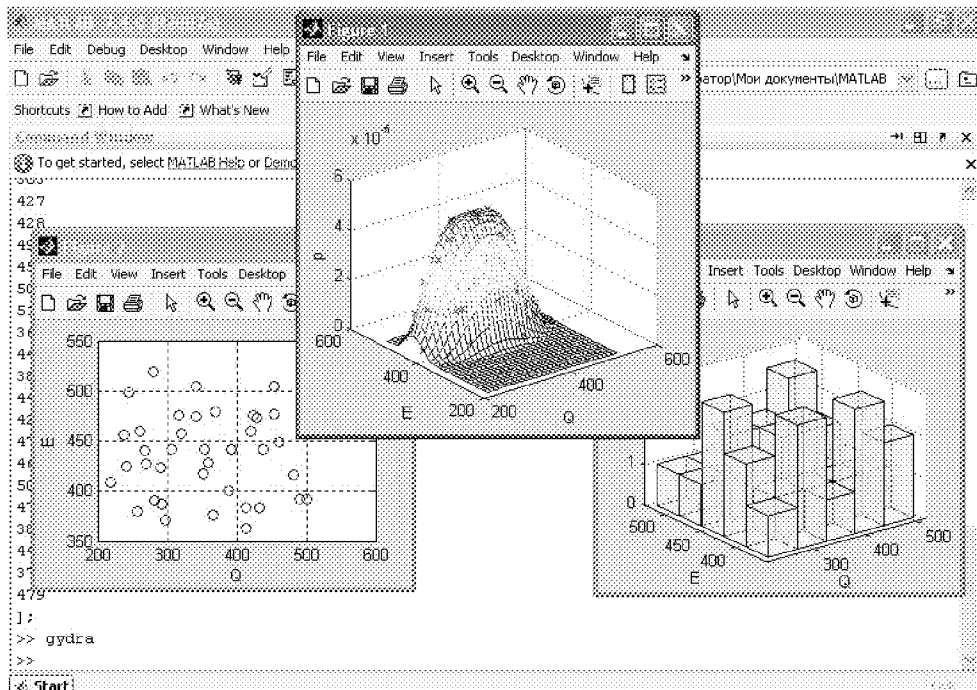
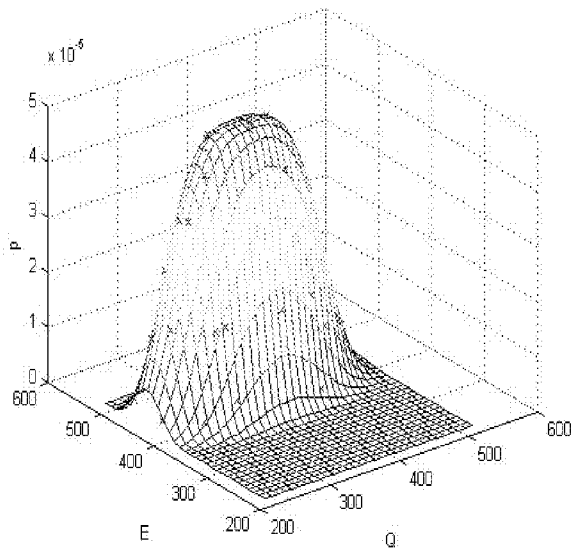
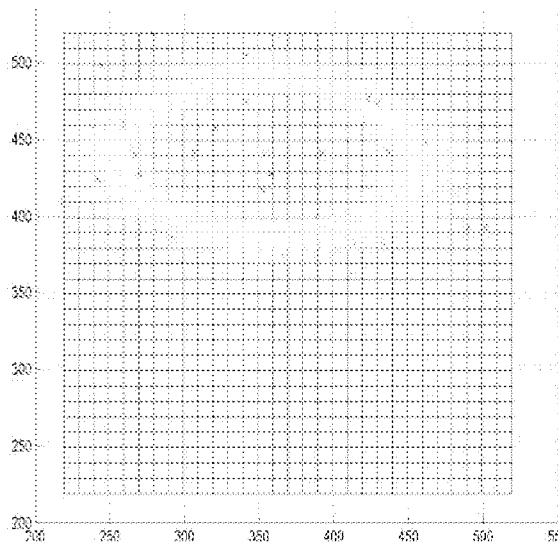


Рисунок 2.8 – Результат работы программы.

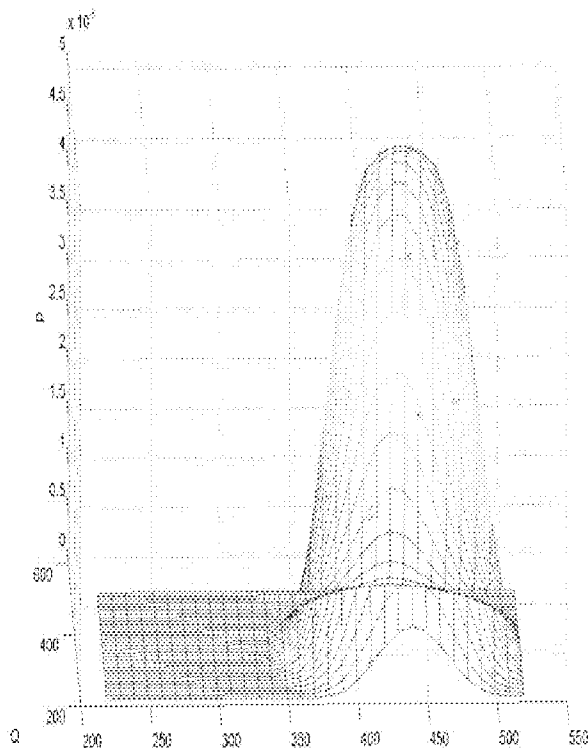
a)



б)



в)



г)

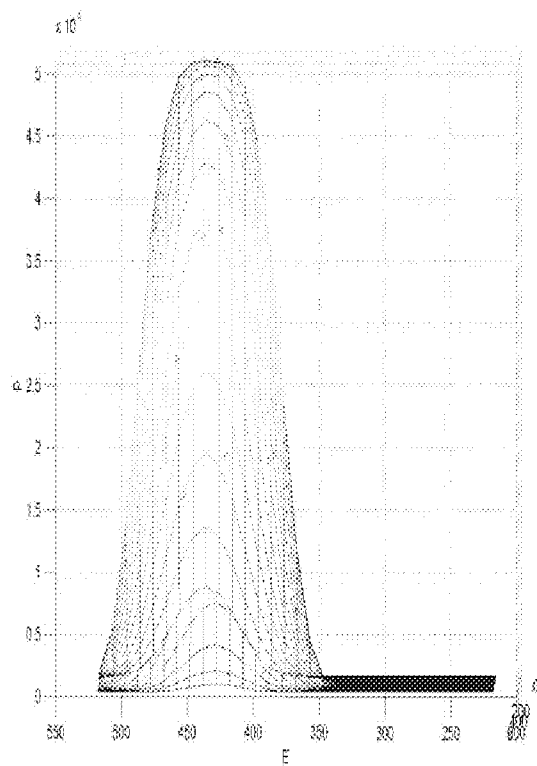
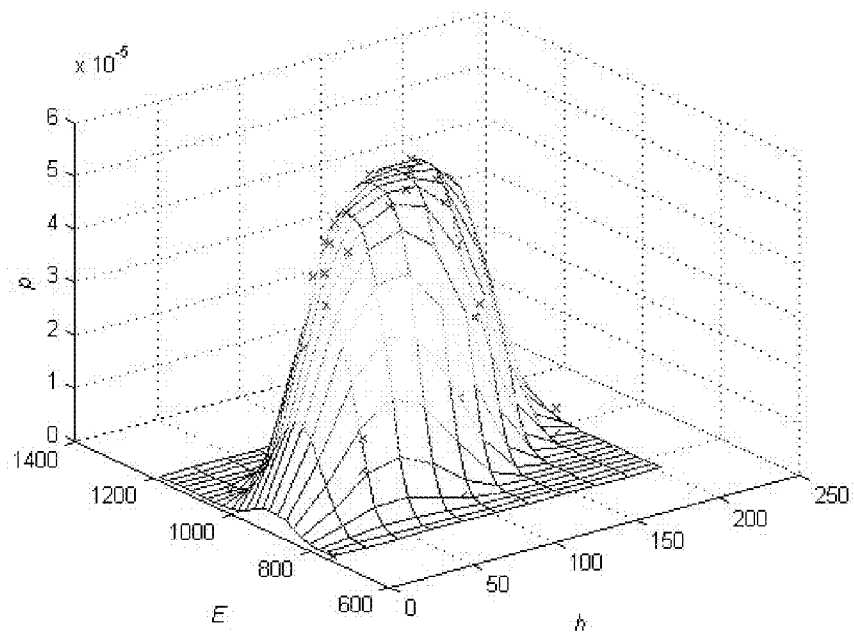


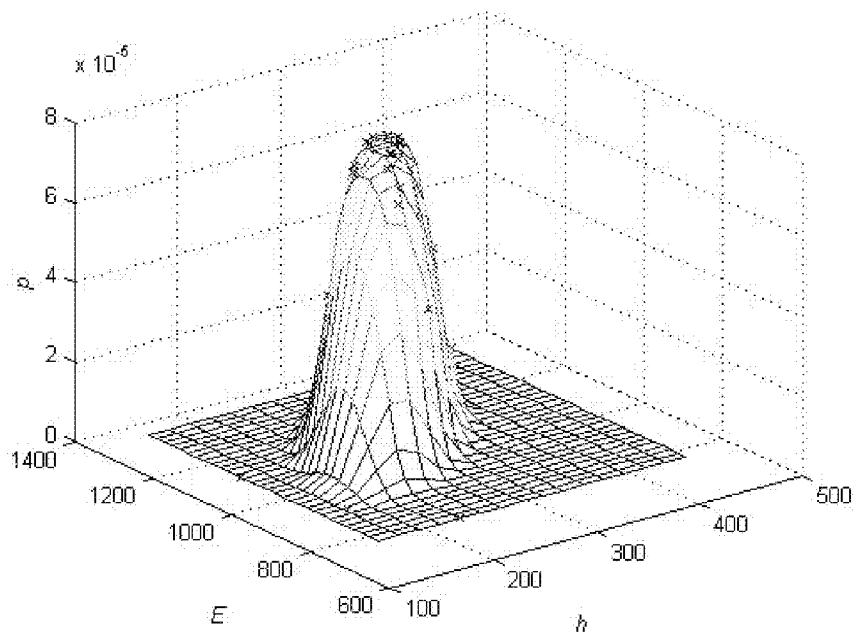
Рисунок 2.9 – Пример возможностей программы.

Построенные поверхности плотности вероятности представлены для примера на рисунке 2.10 и в Приложении Г.

a)



b)



в)

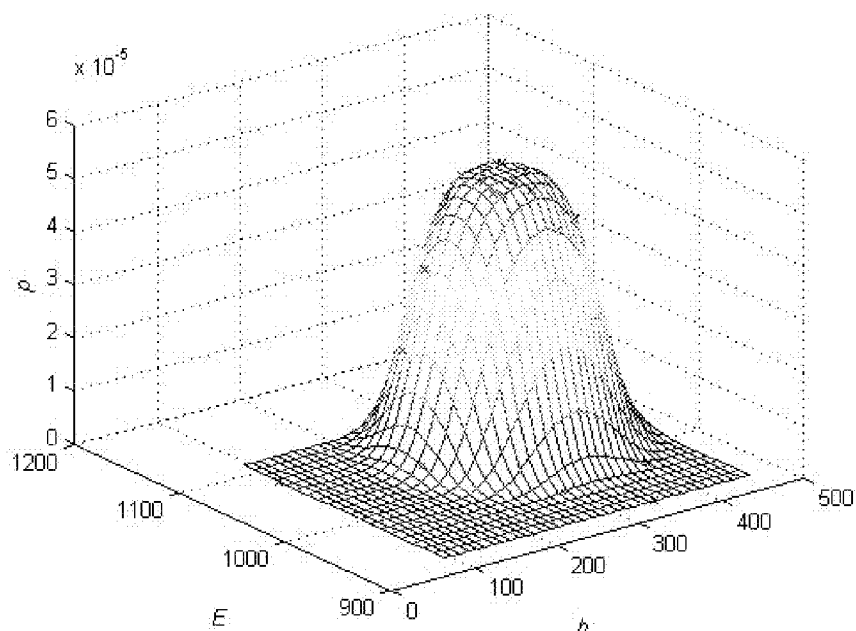


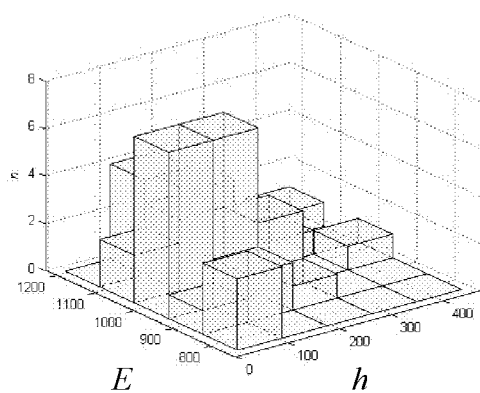
Рисунок 2.10 – Поверхности плотности вероятности: *a* – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Aval; *б* – р. Tano – ст. Alanda; *в* – р. Nyong – ст. Akonolinga.

Полученные поверхности плотности вероятности позволяют оценить форму «колокольчика», но практических навыков работы с ними пока нет. Расчет обеспеченных характеристик приведен ниже.

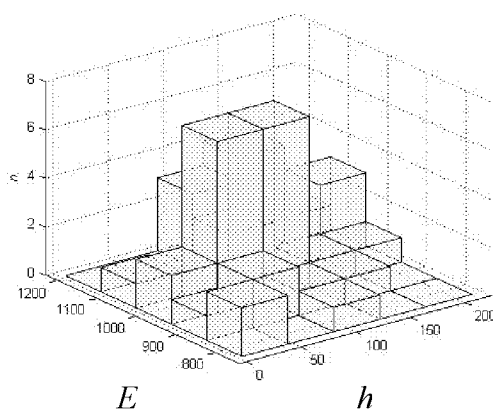
2.3 Условные и безусловные кривые обеспеченности

Ряды стока и испарения (1951–1990 гг.) подверглись стандартной процедуре статистической обработки (исследование на однородность, на наличие маловодного и многоводного периодов, определение расчетных статистических характеристик), см. главу 1. По имеющимся совместным рядам слоя стока и испарения строились эмпирические двумерные гистограммы (примеры см. на рисунке 2.11).

a)



b)



в)

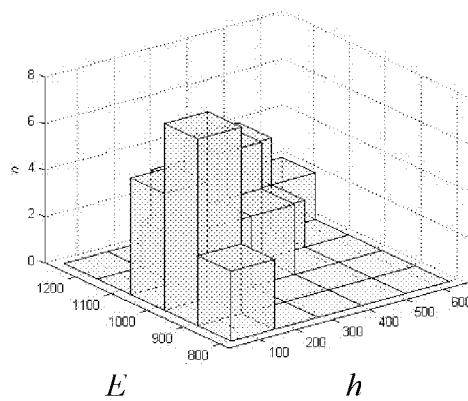


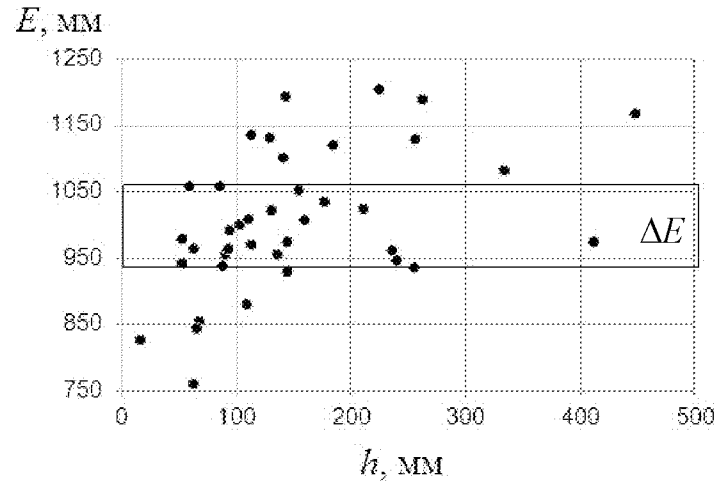
Рисунок 2.11 – Двумерные гистограммы *a* – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Amont; *b* – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Aval; *в* – р. Faleme – ст. Gourbassy

Наличие эмпирических двумерных гистограмм создает возможности для разработки различных двумерных вариантов уравнения (2.5) и способов их решения. В частности для случайных установившихся процессов предложен двумерный аналог уравнения Пирсона для $p(Q, E)$ [22]. Оно представляет собой уравнение в частных производных первого порядка, а его решением методом характеристик служит двумерная поверхность в трехмерном пространстве $p(Q, E)$ [25].

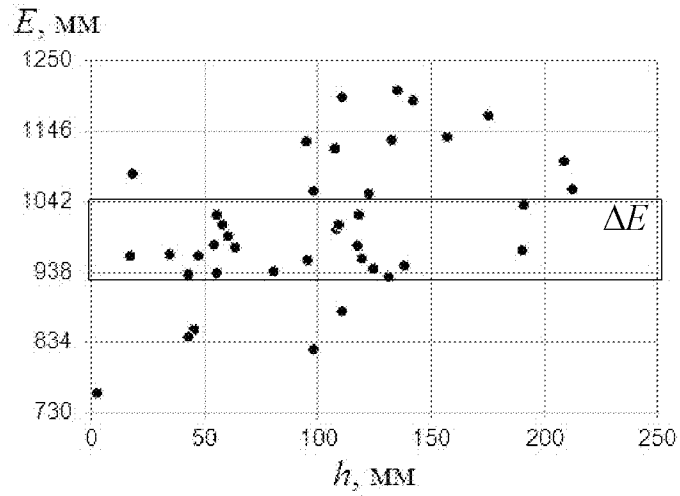
В инженерной гидрологии широко применяется понятие кривой обеспеченности $P(Q)$. В одномерном случае распределение $p(Q)$ легко преобразуется в кривую $P(Q)$, понятие же «двумерная обеспеченность» не применяется. Поэтому, на первый взгляд, многомерные распределения имеют широкую область применения в теоретической гидрологии, но в проектной практике их использование для задания расходов требуемой обеспеченности затруднительно (по крайней мере, такого опыта у проектировщиков нет). Ниже описан возможность по использованию распределений $p(Q, E)$ для получения одномерных кривых обеспеченности с более устойчивыми статистическими моментами.

Идея заключается в переходе от безусловных распределений $p(Q)$ (или $P(Q)$) к условным, в которых условием служит информация об испарении, получаемая из двумерных распределений $p(Q, E)$. На эллипсах рассеивания (рисунок 2.12) выбирается диапазон ΔE , включающие в себя значение нормы испарения \bar{E} , и отсекается от остального поля точек. При пяти столбцах гистограммы по оси испарения отсекаются крайние. По точкам, попавшим в диапазон ΔE , строятся условные кривые обеспеченности ($p(Q / \Delta E)$). В результате этой процедуры происходят как негативные, так и позитивные последствия.

a)



b)



в)

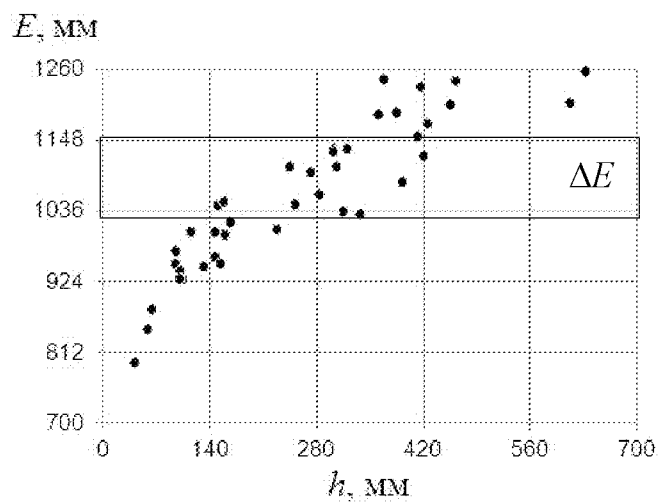


Рисунок 2.12 – Эллипсы рассеивания: *a* – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Amont; *b* – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Aval; *в* – р. Faleme – ст. Gourbassy.

а) Происходит усечение ряда расходов воды за счет маловероятных значений расхода и испарения. Погрешность определения нормы, коэффициентов вариации C_v и асимметрии C_s при этом увеличивается: при $C_v = 0,3$ и уменьшении объема выборки в два раза погрешность определения C_v увеличивается с 9,53 % до 13,5%, т. е. на 30 % [27].

б) Однако применение условных распределений открывает возможность корректного (устойчивого) прогнозирования в зонах с неустойчивым формированием стока. Природу этой корректности можно пояснить на примере стационарного уравнения для первого момента из системы (2.3). Для равновесного климатического сценария первый момент находится из уравнения:

$$m_1^{\text{pp}} = (-0.5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}) / (\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}}). \quad (2.18)$$

При $\beta = G_{\tilde{c}} / \bar{c} \rightarrow 2$ надо производить деление на величину близкую к нулю. Для неустойчивых южных регионах ЕТР (а также в Африке в речных бассейнах с малыми коэффициентами стока), где $k=0,05$ ($\bar{c} = 20$) величина $G_{\tilde{c}}$ близка к 40. Даже, если β далек от двух, то все равно из-за неизбежных погрешностей при параметризации получается малая разность двух неточных величин. Это делает расчеты очень неточными. Для старших моментов ситуация только усугубляется [27].

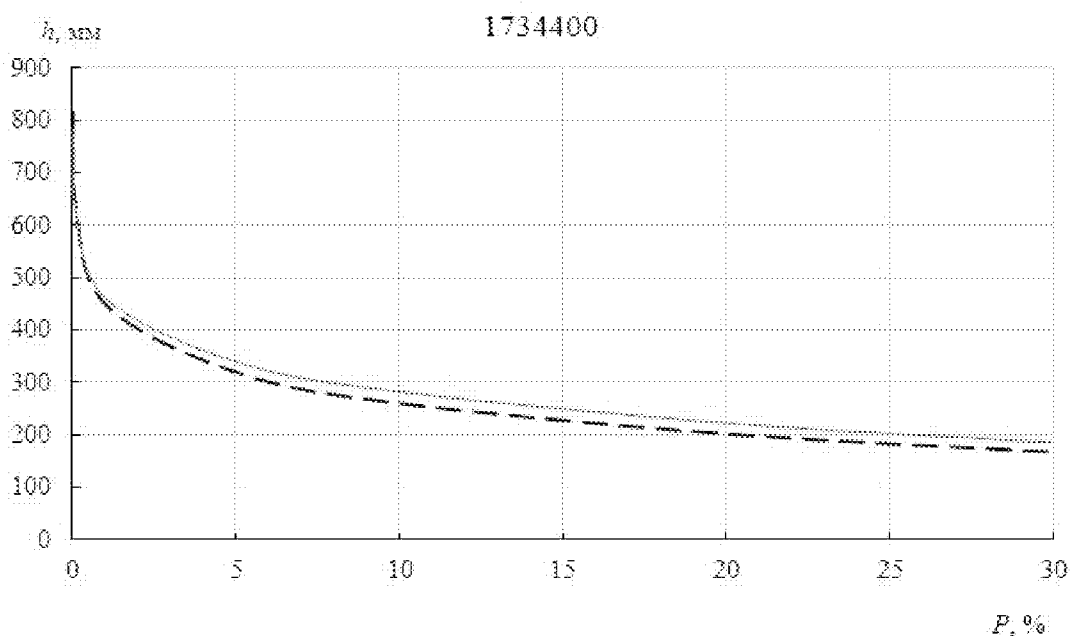
Таким образом, эффект от применения условных распределений (по сравнению с неустойчивыми безусловными) достигается за счет того, что, отбрасывая члены рядов с большими испарениями, мы уменьшаем интенсивность мультипликативного шума $G_{\tilde{c}}$, оставляя неизменным параметр \bar{c} , т. е. увеличиваем разность $(\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}})$. Таким же путем, правда неявно, идет и классическая гидрология вообще выбрасывая из рассмотрения четвертый момент m_4 , связанный с эксцессом и интенсивностью $G_{\tilde{c}}$, а значит и с «поднятием хвоста» распределения $p(Q)$, порождающим неустойчивость. Так как

она не имеет дело с генетическими моделями (2.2), то проблема неустойчивости, в рассматриваемом смысле, для нее вообще отсутствует. Еще следует заметить, что если в модели (2.2) в качестве внешнего воздействия взять не просто $\bar{N} \sim \dot{X}$, а $\bar{N} \sim \dot{X} - E$, то $\bar{c} \rightarrow 1$, и «шуметь» практически «нечему», так как $G_{\bar{c}} \rightarrow 0$, $\beta \rightarrow 0$ [32].

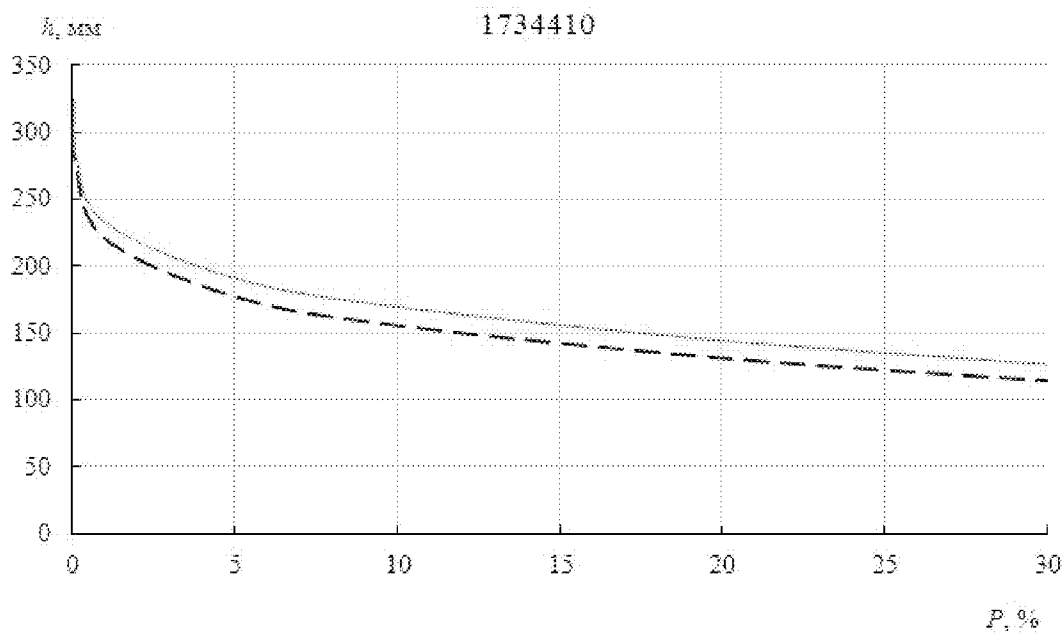
На рисунке 2.13 приведен пример, показывающий, что проэкстраполированный в зону малых обеспеченностей «хвост» условного распределения быстрее приближается к оси стока, чем безусловный. Объективную картину скорости этого приближения дает таблица 2.1, в которой приведены результаты вычисления слоя стока 0,1; 1; 10 %-ной обеспеченности по безусловным и условным распределениям (в таблице: откл. = (безусл. – усл.)/усл.). Отклонения встречаются и минусовые, но в целом (среднем арифметическом) условные распределения имеют меньшие значения, причем тем меньше, чем меньше обеспеченность.

На рисунке 2.14 представлено распределение средних отклонений по территории Западной Африки.

a)



б)



в)

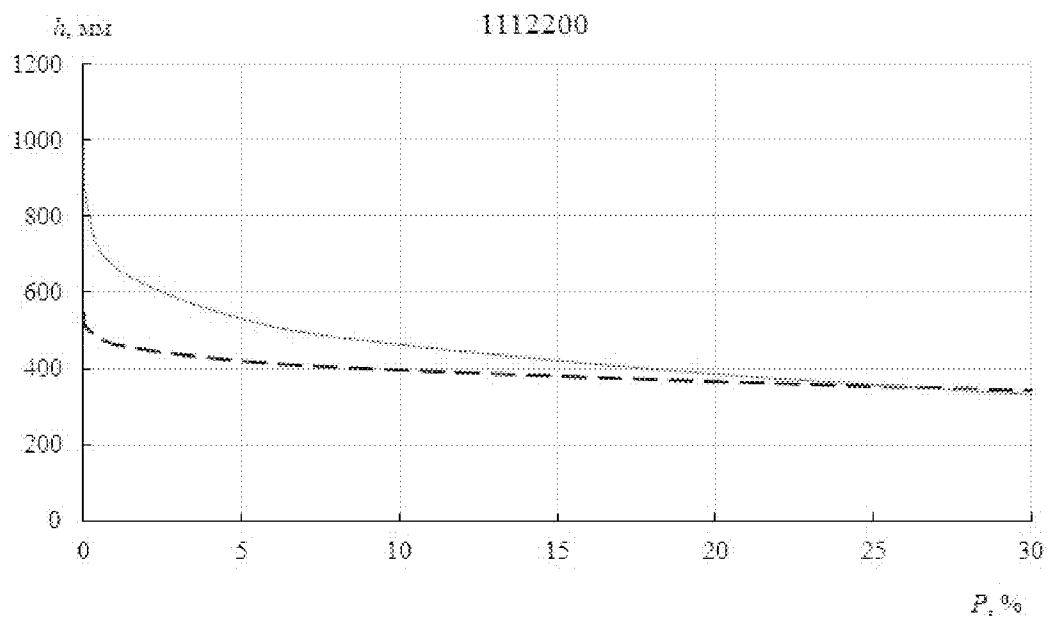


Рисунок 2.13 – Безусловные (—) и условные (---) кривые обеспеченностей: а – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Amont; б – р. Alibori – ст. Route Kandi-Banikoara Aval; в – р. Faleme – ст. Gourbassy.

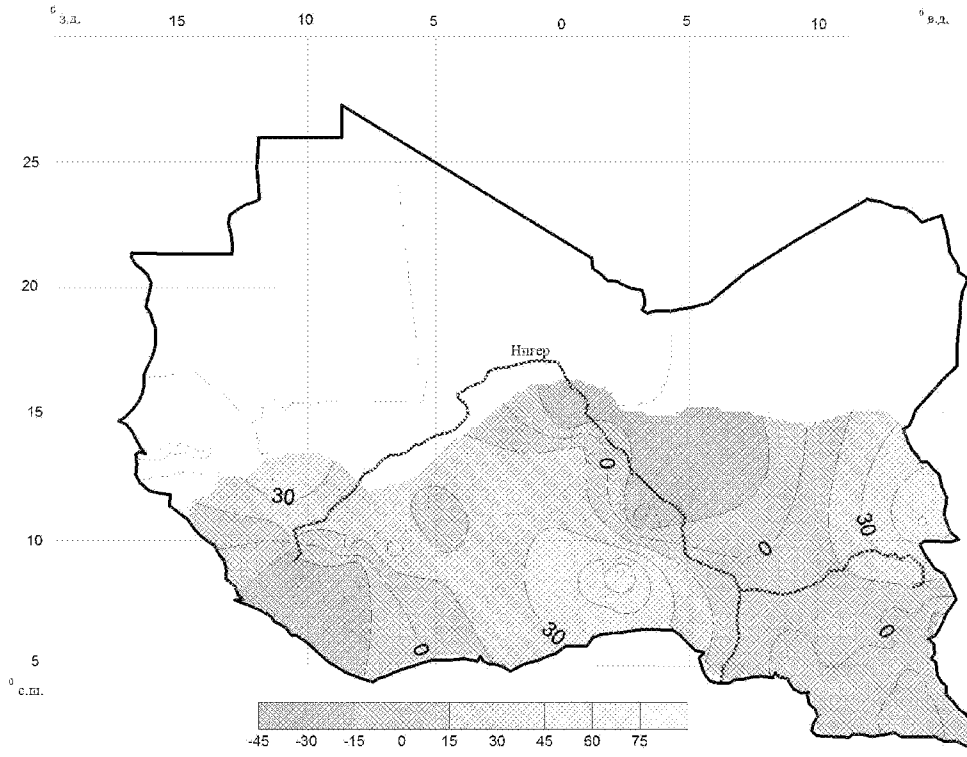
Таблица 2.1 – Сопоставление безусловных и условных обеспеченных значений стока

| № поста | Река | Станция | Обеспеченность, % | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|-----------------------------|-------------------|------|----------|---------|------|----------|---------|------|----------|--|--|--|
| | | | 0,1 | | | 1 | | | 10 | | | | | |
| | | | безусл. | усл. | откл., % | безусл. | усл. | откл., % | безусл. | усл. | откл., % | | | |
| 1 | Tinkisso | Dabola | 1401 | 1213 | 13 | 1052 | 940 | 11 | 668 | 627 | 6 | | | |
| 3 | Niger | Faranah | 1735 | 1984 | -14 | 1512 | 1660 | -10 | 1225 | 1288 | -5 | | | |
| 4 | Milo | Kankan | 1090 | 923 | 15 | 978 | 848 | 13 | 821 | 738 | 10 | | | |
| 5 | Niandan | Baro | 1164 | 1200 | -3 | 1016 | 1052 | -4 | 812 | 844 | -4 | | | |
| 6 | Niger | Kouroussa | 1340 | 1092 | 18 | 1040 | 895 | 14 | 707 | 657 | 7 | | | |
| 7 | Sankarani | Mandiana | 1003 | 837 | 17 | 802 | 702 | 12 | 581 | 544 | 6 | | | |
| 8 | Irane | Koutakoukrou | 543 | 732 | -35 | 398 | 480 | -21 | 238 | 230 | 3 | | | |
| 9 | Couffo | Lanhounta | 680 | 374 | 45 | 444 | 274 | 38 | 210 | 164 | 22 | | | |
| 10 | Alibori | Route Kandi-Banikoara Amont | 627 | 634 | -1 | 461 | 449 | 3 | 282 | 260 | 8 | | | |
| 11 | Alibori | Route Kandi-Banikoara Aval | 282 | 275 | 3 | 233 | 221 | 5 | 170 | 156 | 8 | | | |
| 12 | Mono | Athieme | 764 | 462 | 40 | 601 | 383 | 36 | 395 | 283 | 28 | | | |
| 14 | Oueme | Pont De Save | 548 | 297 | 46 | 423 | 253 | 40 | 277 | 195 | 30 | | | |
| 15 | Oueme | Bonou | 666 | 128 | 81 | 462 | 128 | 72 | 253 | 128 | 49 | | | |

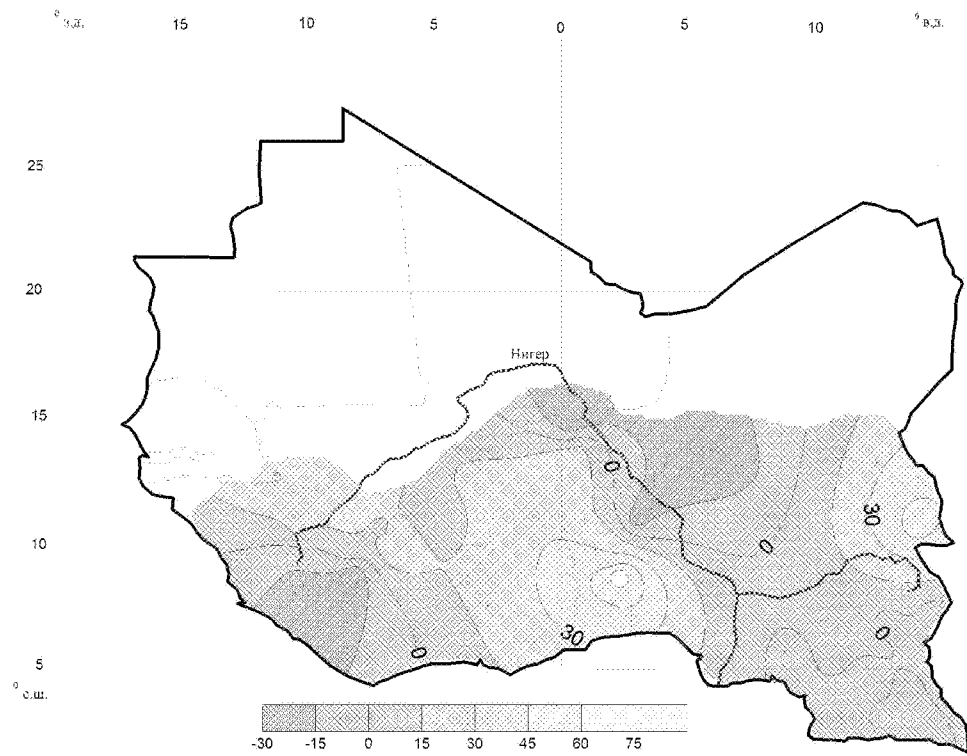
| № поста | Река | Станция | Обеспеченность, % | | | | | | | | | | | |
|---------|-------------|--------------|-------------------|------|----------|---------|------|----------|---------|------|----------|--|--|--|
| | | | 0,1 | | | 1 | | | 10 | | | | | |
| | | | безусл. | усл. | откл., % | безусл. | усл. | откл., % | безусл. | усл. | откл., % | | | |
| 16 | Bagoe | Tombougou I | 1709 | 1069 | 37 | 1267 | 898 | 29 | 819 | 702 | 14 | | | |
| 18 | Sankarani | Gouala | 1164 | 992 | 15 | 865 | 744 | 14 | 538 | 469 | 13 | | | |
| 19 | Faleme | Gourbassy | 837 | 507 | 39 | 667 | 463 | 31 | 463 | 397 | 14 | | | |
| 20 | Comoe | Diarabakoko | 446 | 429 | 4 | 352 | 328 | 7 | 241 | 214 | 11 | | | |
| 21 | Black Volta | Boromo | 73 | 56 | 24 | 62 | 50 | 19 | 47 | 42 | 10 | | | |
| 22 | Maradi | Madarounfa | 148 | 184 | -24 | 110 | 131 | -20 | 68 | 76 | -12 | | | |
| 23 | Dargol | Kakassi | 73 | 63 | 14 | 60 | 51 | 14 | 43 | 36 | 16 | | | |
| 24 | Garouol | Dolbel | 148 | 165 | -12 | 110 | 118 | -8 | 69 | 70 | -1 | | | |
| 25 | Sirba | Garbe-Kourou | 57 | 43 | 24 | 48 | 34 | 29 | 36 | 24 | 34 | | | |
| 26 | Garouol | Alcongou | 34 | 43 | -27 | 23 | 29 | -30 | 12 | 15 | -34 | | | |
| 27 | Tsanaga | Bogo | 1022 | 386 | 62 | 672 | 316 | 53 | 324 | 236 | 27 | | | |
| 28 | Bini | Berem | 685 | 653 | 5 | 652 | 635 | 3 | 601 | 597 | 1 | | | |
| 29 | Vina | Lahore | 897 | 859 | 4 | 878 | 852 | 3 | 825 | 817 | 1 | | | |
| 30 | Ndjeke | Ngongon | 517 | 560 | -8 | 497 | 513 | -3 | 453 | 445 | 2 | | | |
| 31 | Mape | Magba | 1057 | 1022 | 3 | 998 | 962 | 4 | 906 | 873 | 4 | | | |

| № поста | Река | Станция | Обеспеченность, % | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------|------------|-------------------|------|----------|---------|------|----------|---------|------|----------|---------|------|----------|--|--|
| | | | 0,1 | | | | 1 | | | | 10 | | | | | |
| | | | безусл. | усл. | откл., % | безусл. | усл. | откл., % | безусл. | усл. | откл., % | безусл. | усл. | откл., % | | |
| 32 | Noun | Bafoussam | 941 | 847 | 10 | 901 | 835 | 7 | 827 | 794 | 4 | | | | | |
| 33 | Dja | Somalomo | 709 | 597 | 16 | 616 | 529 | 14 | 502 | 445 | 11 | | | | | |
| 34 | Nyong | Ayos | 460 | 484 | -5 | 447 | 469 | -5 | 413 | 430 | -4 | | | | | |
| 36 | Mbere | Mbere | 897 | 1058 | -18 | 763 | 869 | -14 | 607 | 659 | -8 | | | | | |
| 37 | Nyong | Akonolinga | 454 | 468 | -3 | 443 | 456 | -3 | 413 | 423 | -2 | | | | | |
| 38 | Kadei | Batouri | 605 | 564 | 7 | 552 | 514 | 7 | 487 | 456 | 6 | | | | | |
| 39 | Lom | Betare-Oya | 783 | 881 | -13 | 695 | 759 | -9 | 595 | 624 | -5 | | | | | |
| 40 | Nyong | Kaya | 561 | 564 | 0 | 540 | 542 | 0 | 495 | 492 | 1 | | | | | |
| 41 | Ntem | Ngoazik | 814 | 860 | -6 | 722 | 769 | -7 | 603 | 643 | -7 | | | | | |
| 42 | Nyong | Olama | 848 | 950 | -12 | 750 | 775 | -3 | 611 | 578 | 5 | | | | | |
| 43 | Kadei | Pana | 549 | 549 | 0 | 496 | 489 | 1 | 430 | 418 | 3 | | | | | |
| 44 | Djerem | Mbakaou | 961 | 1022 | -6 | 878 | 933 | -6 | 763 | 809 | -6 | | | | | |
| 45 | Mbam | Goura | 712 | 720 | -1 | 692 | 694 | 0 | 644 | 636 | 1 | | | | | |
| 46 | Logone | Moundou | 670 | 780 | -16 | 632 | 690 | -9 | 554 | 566 | -2 | | | | | |
| среднее откл., % | | | 17 | | | | 14 | | | | 10 | | | | | |

a)



b)



б)

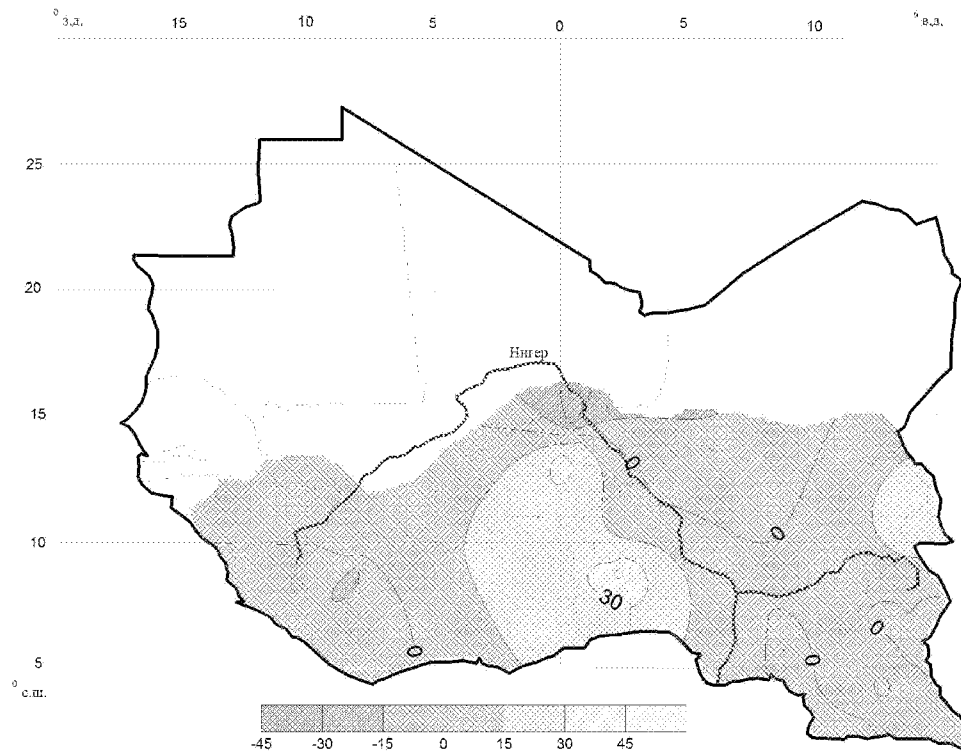


Рисунок 2.14 – Распределение средних отклонений условных от безусловных обеспеченностей по территории Западной Африки:

$a - 0,1\%$; $b - 1\%$; $c - 10\%$.

3 ОДНОМЕРНЫЕ МНОГООБРАЗИЯ КРИВЫХ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ДЛЯ СУЩЕСТВУЮЩЕГО РЕЖИМА

В работе [8] на примере Африканского континента представлена методология оценки долгосрочных изменений вероятностных характеристик многолетнего речного стока при изменении климата. Она базируется на стационарном варианте уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова. Последнее аппроксимируется системой алгебраических уравнений для начальных моментов, с помощью которых вычисляются расчетные гидрологические характеристики (норма \bar{Q} , коэффициенты вариации C_v и асимметрии C_s). С их помощью, по известным в статистике таблицам, находятся ординаты кривых обеспеченности, которые используются при вычислении надежности проектируемых и эксплуатируемых гидротехнических сооружений.

В настоящее время кривые обеспеченности строят по фактическим рядам наблюдений. Использование рассматриваемой в диссертации модели позволяет построить эти кривые с учетом климатических сценариев, предлагаемых Межправительственной комиссией экспертов по изменению климата [33]. Стационарность модели обуславливается характером климатических сценариев, которые рекомендуется использовать как 20–30-летние статистически равновесные периоды с неизменными нормами метеорологических характеристик (осадков и приземной температуры воздуха). Выяснилось [21], что вероятностные распределения рядов многолетнего испарения также принадлежит классу распределений Пирсона. Это делает правомерным применение к испарению модели, аналогичной таковой для речного стока с несколько видоизмененной интерпретацией входящих в нее параметров. Методология рассмотрена ниже в главе 4.

На рисунке 3.1 в качестве примера представлены карты пространственного распределения по территории Африки нормы (*a*) и коэффициента вариации (*b*) суммарного годового испарения [8].

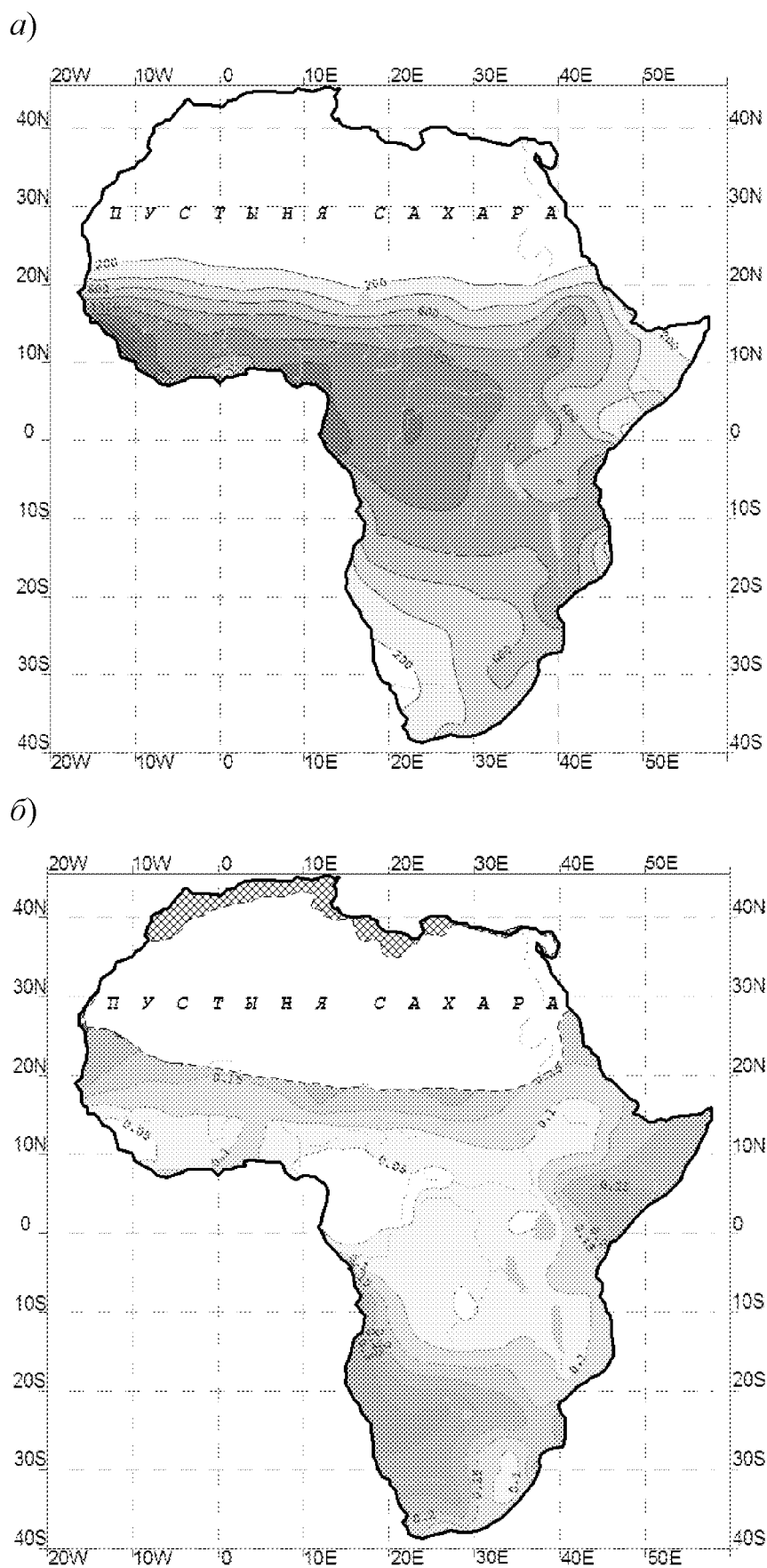


Рисунок 3.1 – Распределение нормы (а) и коэффициента вариации (б) испарения на территории Африки [8].

В строительном проектировании используются кривые обеспеченности расхода и испарения, которые в рамках семейства распределений Пирсона строятся по первым трем моментам, а точнее расчетным характеристикам: норме, коэффициентам вариации и асимметрии. Совместное визуальное представление этих кривых обеспеченности можно осуществить, используя одномерные многообразия в трехмерном пространстве (обеспеченность P , испарение E , сток Q).

Технические возможности эффективной совместной визуализации кривых обеспеченности стока и испарения с помощью одномерного многообразия в пространстве обеспеченность – сток – испарение будем реализовывать в компьютерном приложении *MatLab*. В главе 2 уже сделан анализ этого приложения с описанием его достоинств.

Одномерное многообразие – это трехмерный график, поэтому строить его будем при помощи встроенной функции *plot3* (x, y, z).

Одномерные многообразия были построены для всех рассматриваемых водосборов Западной Африки. Примеры их показаны на рисунке 3.2, остальные зависимости представлены в Приложении Е.

По стандартным кривым обеспеченности с неустойчивыми («толстыми») хвостами довольно затруднительно снять малообеспеченные значения как стока, так и испарения (хвосты почти параллельны оси гидрометеорологической характеристики). В этом (неустойчивом) случае применение одномерных многообразий делу не поможет. Поэтому в любом варианте надо обеспечить устойчивость моментов. Это можно сделать либо переводом мультипликативных шумов в аддитивные, либо решая (при сценарных оценках) двумерное уравнение Пирсона (для стока и испарения) методами характеристик, либо используя условные распределения. В этом случае устойчивость одной из характеристик гарантирует устойчивость другой.

Интерес представляет географическая закономерность распределения по территории Западной Африки одновременно расположение расходов и испарения малой обеспеченности, которая для многих водозависимых отрас-

лей экономики является лимитирующей. Для удобства построения подобных карт использованы квазигистограммы 0,1 %, 1 % и 10 %-ной обеспеченности всех используемых рядов, представленных на рисунке 3.3 и в Приложении Е. На рисунке 3.4 представлены подобные карты, которые показывают, что для всех обеспеченностей для гидрометеорологических станций под номерами 20–27 (см. таблицу 2.1) (области предпустынных территорий) значения стока и испарения меньше, чем для всей остальной территории Западной Африки. Значительные выбросы испарения наблюдаются на станциях № 1 и № 35 (бассейны влажных экваториальных лесов).

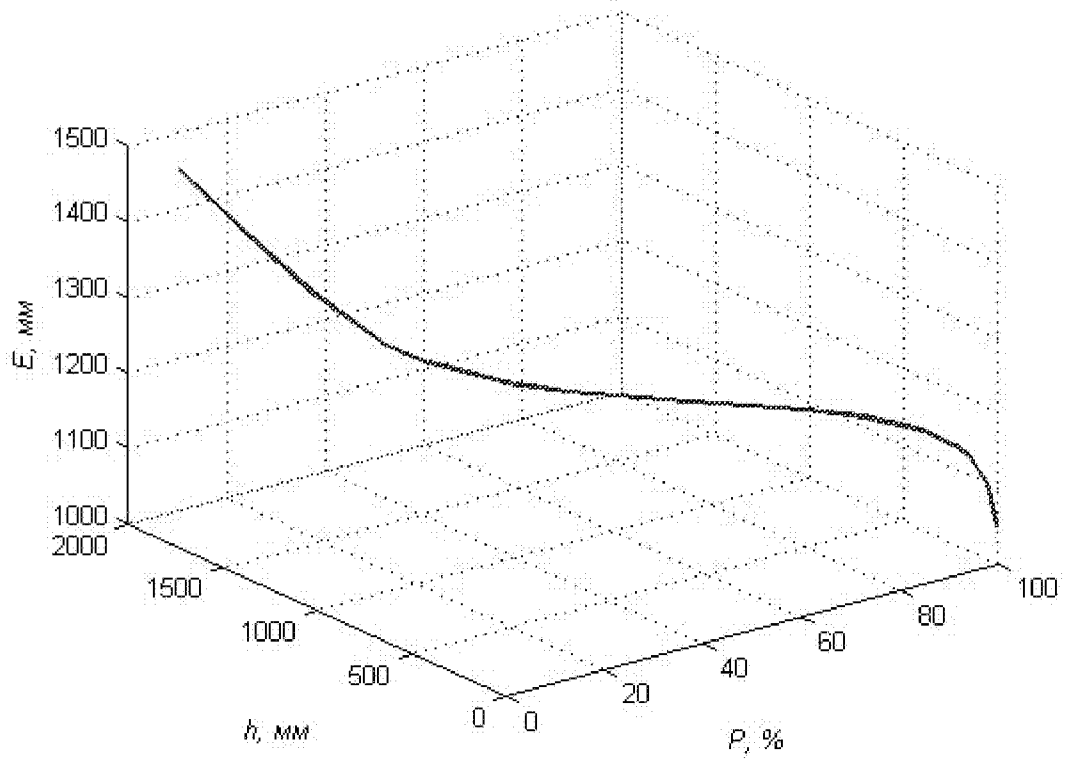
В четвертой главе аналогичная работа проделана для сценарных значений стока и испарения и построены карты наиболее существенных различий между фактическими и прогнозными значениями стока и испарения малой обеспеченности.

На рисунке 3.3 показаны значения стока и испарения 0,1 %, 1 % и 10 %-ой обеспеченности. По одномерным многообразиям не снять обеспеченные значения стока, надо уже оперировать двумя обеспеченными значениями – стока и испарения. Именно по этой причине одномерные многообразия являются устойчивыми, не обладающими «толстыми хвостами». Произошло объединение двух предметных областей, вследствие чего исчезли взаимные шумы, которые вызывали неустойчивость. Если по условным кривым берется обеспеченное значение стока соответствующее, например, норме испарения, то при одномерных многообразиях, испарение является также обеспеченным.

На рисунке 3.4 представлены карты распределения стока и испарения 0,1; 1; 10 %-ной обеспеченностей.

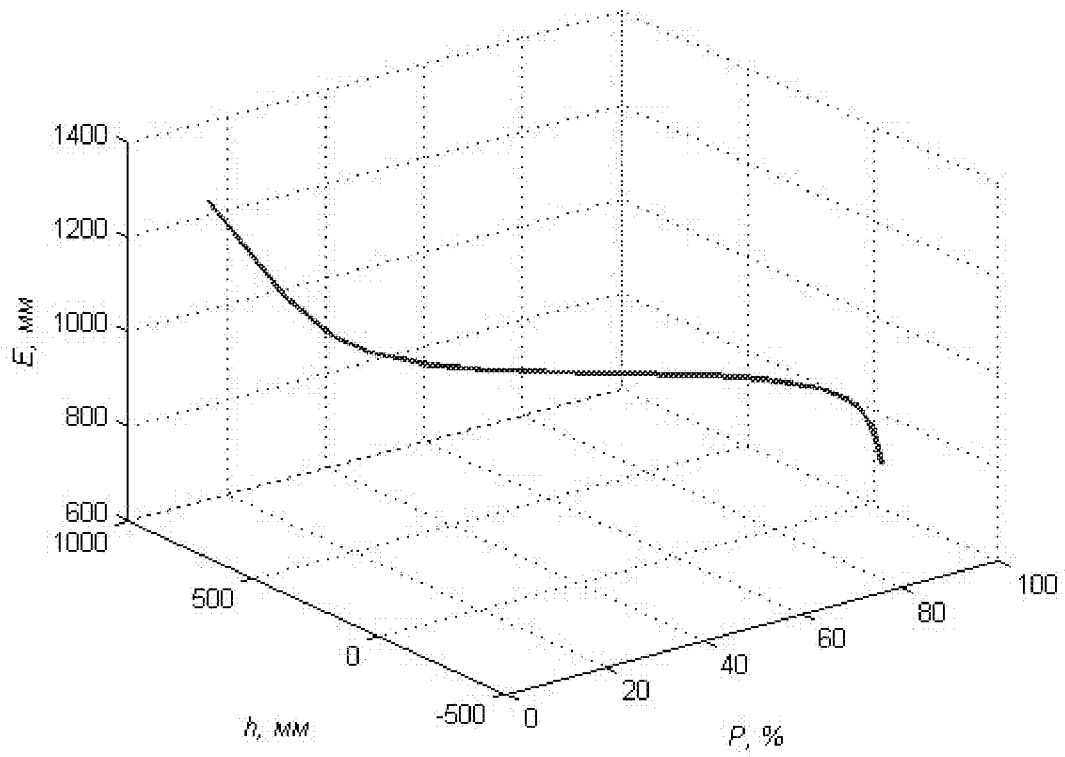
a)

1634200



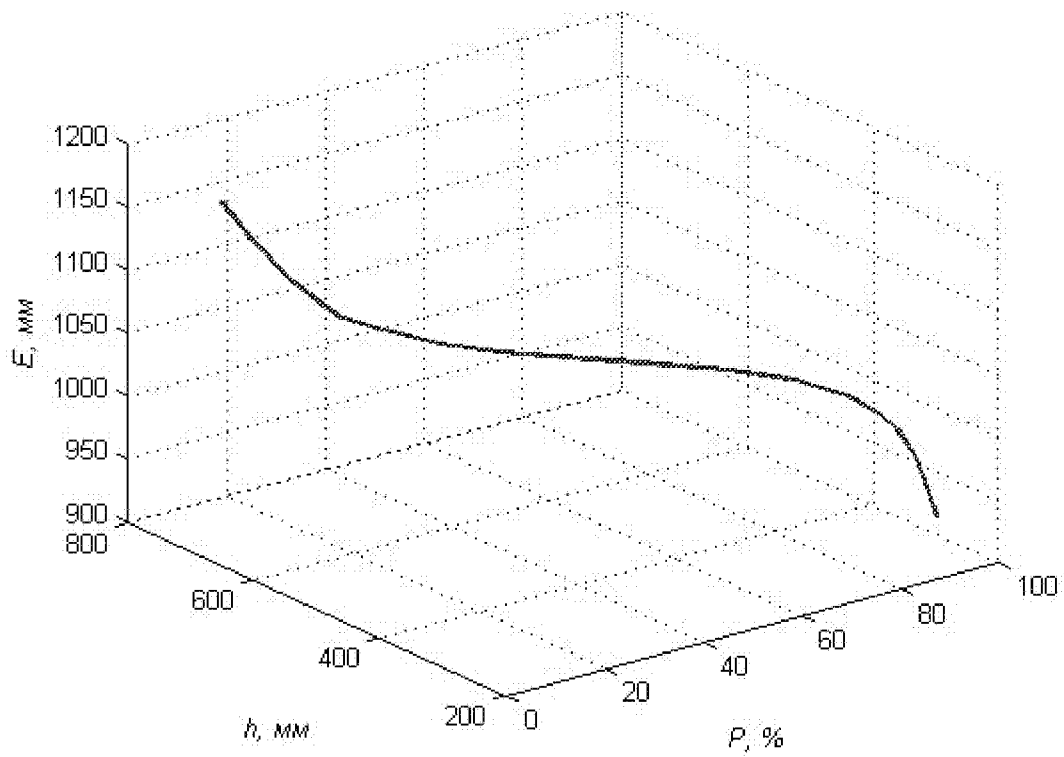
b)

1726100



б)

1338201



в)

1537180

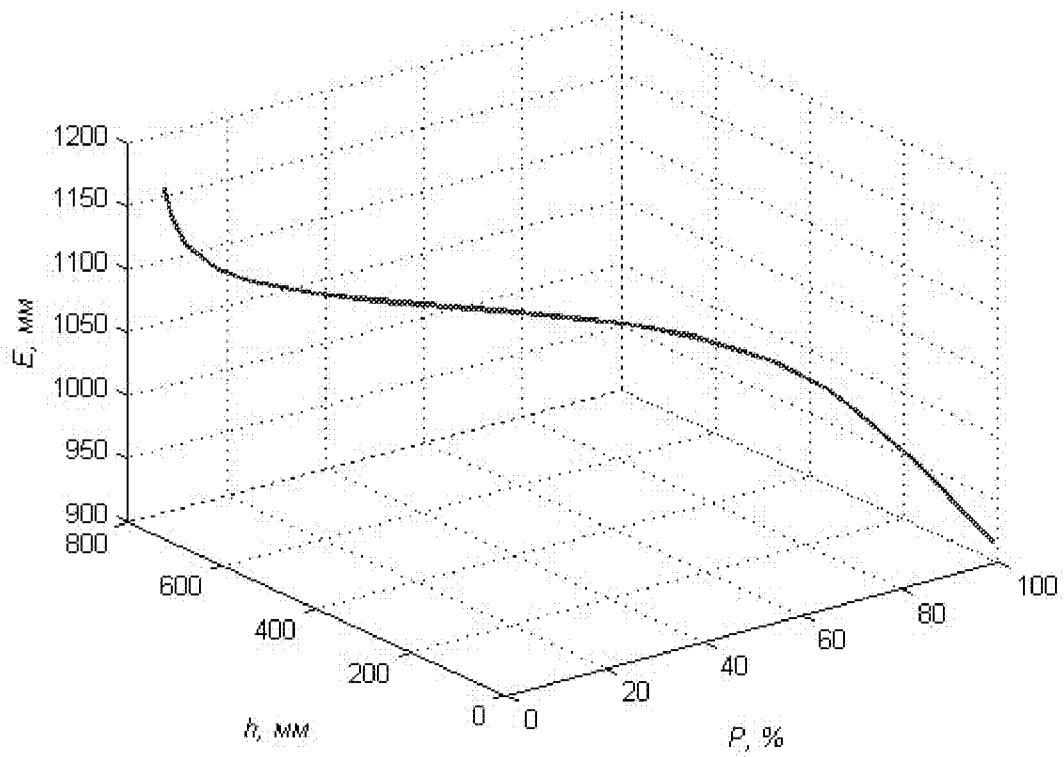
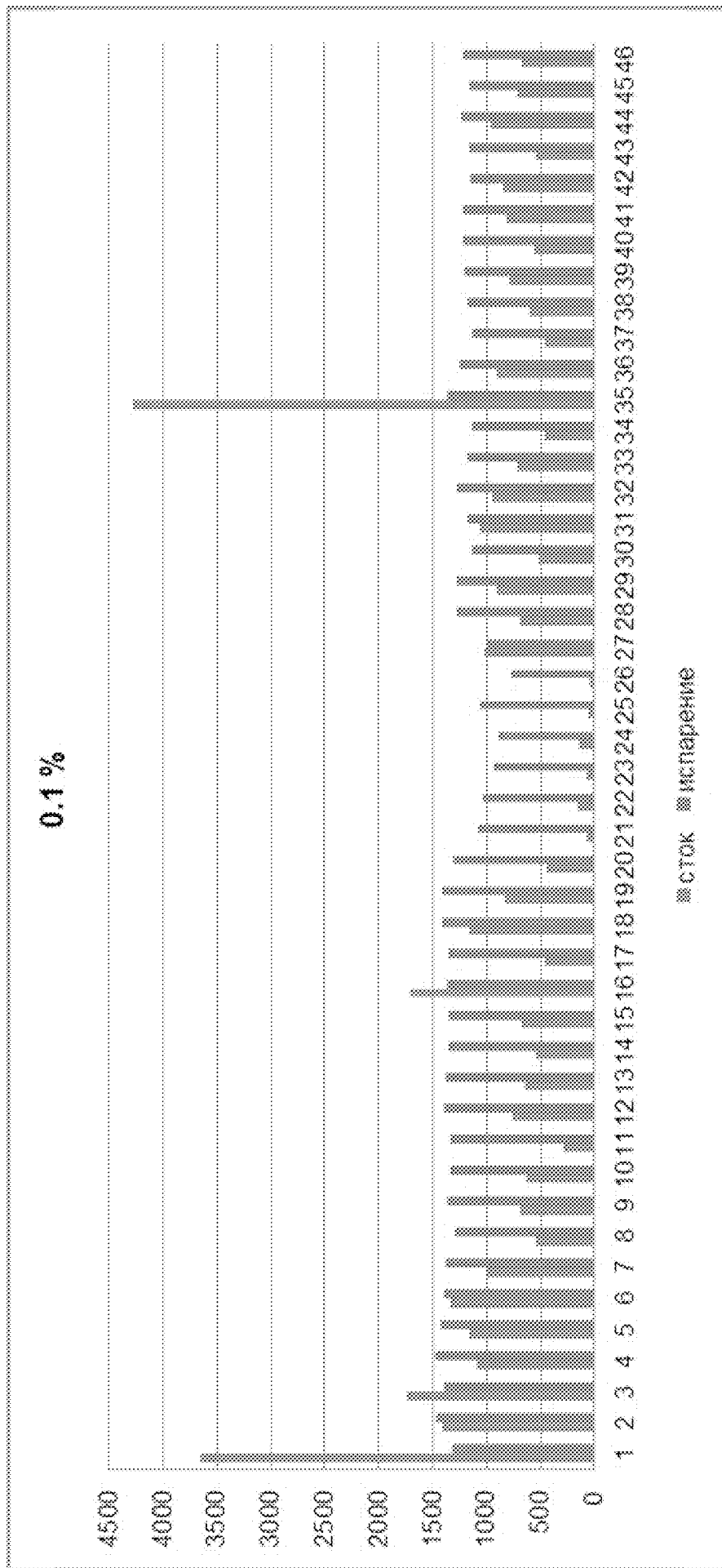
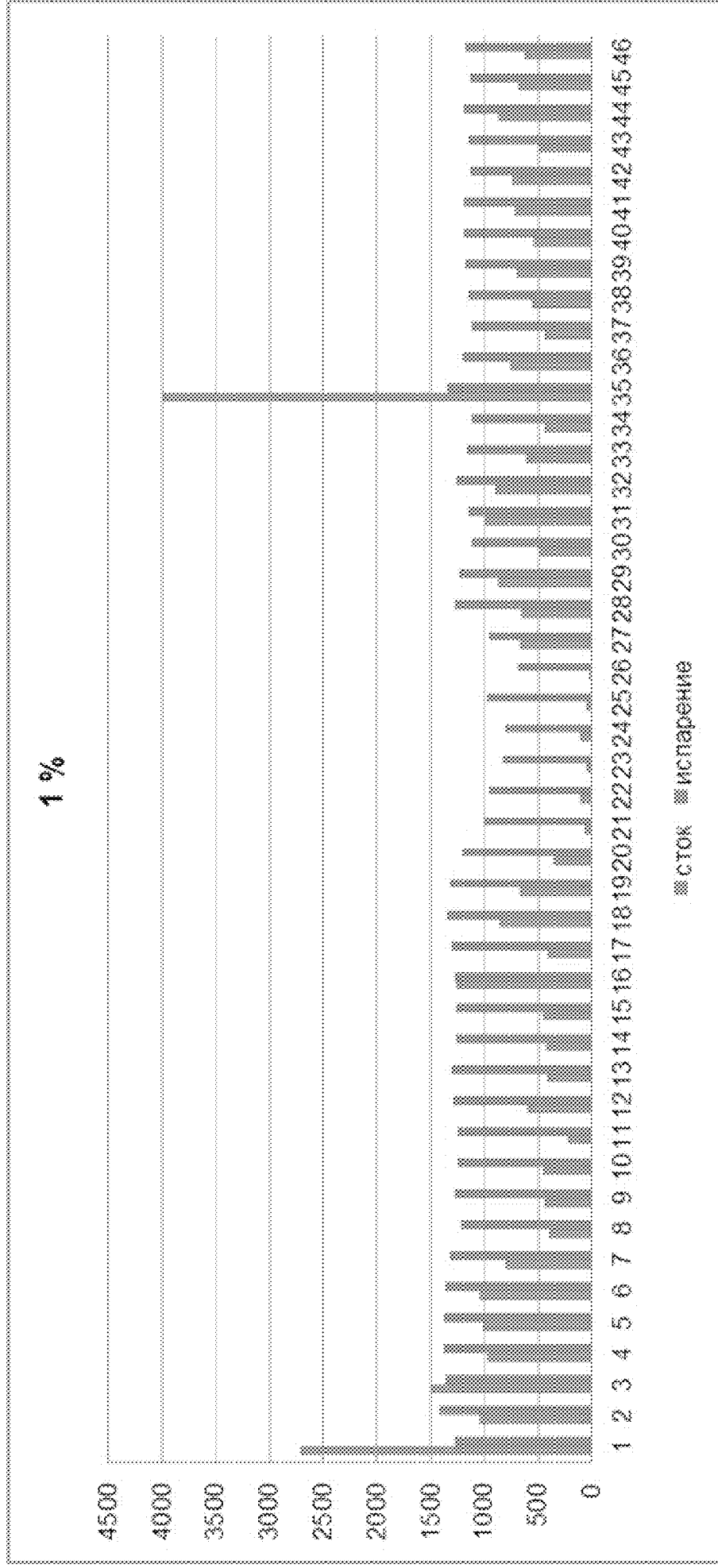


Рисунок 3.2 – Одномерные многообразия для рек Западной Африки.

a)



6)



6)

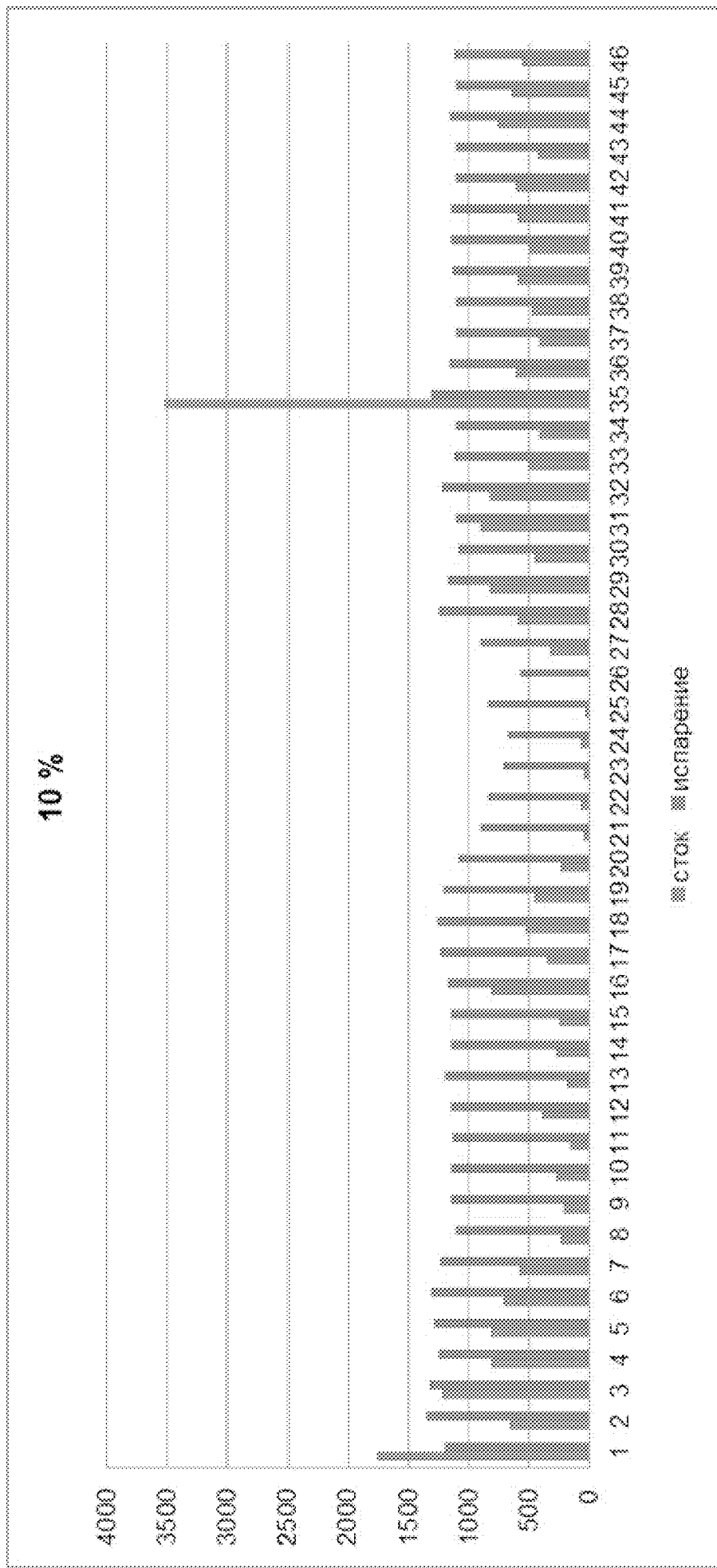
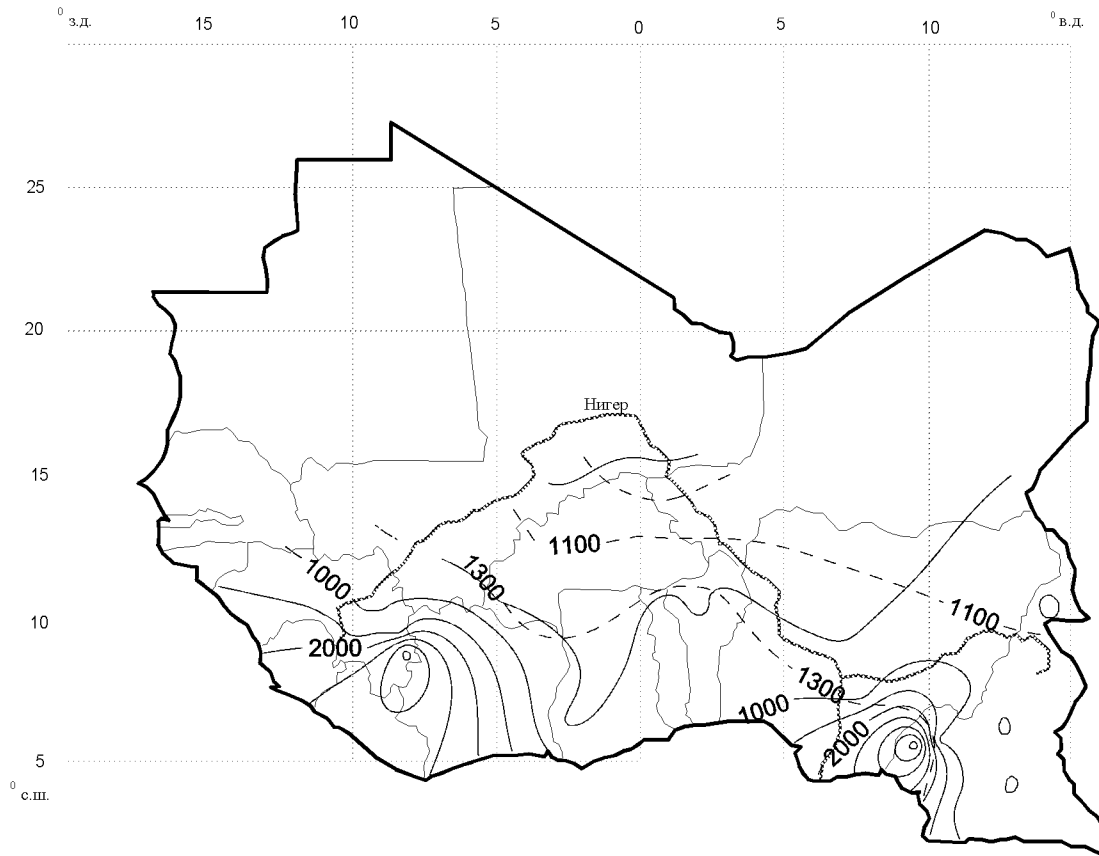
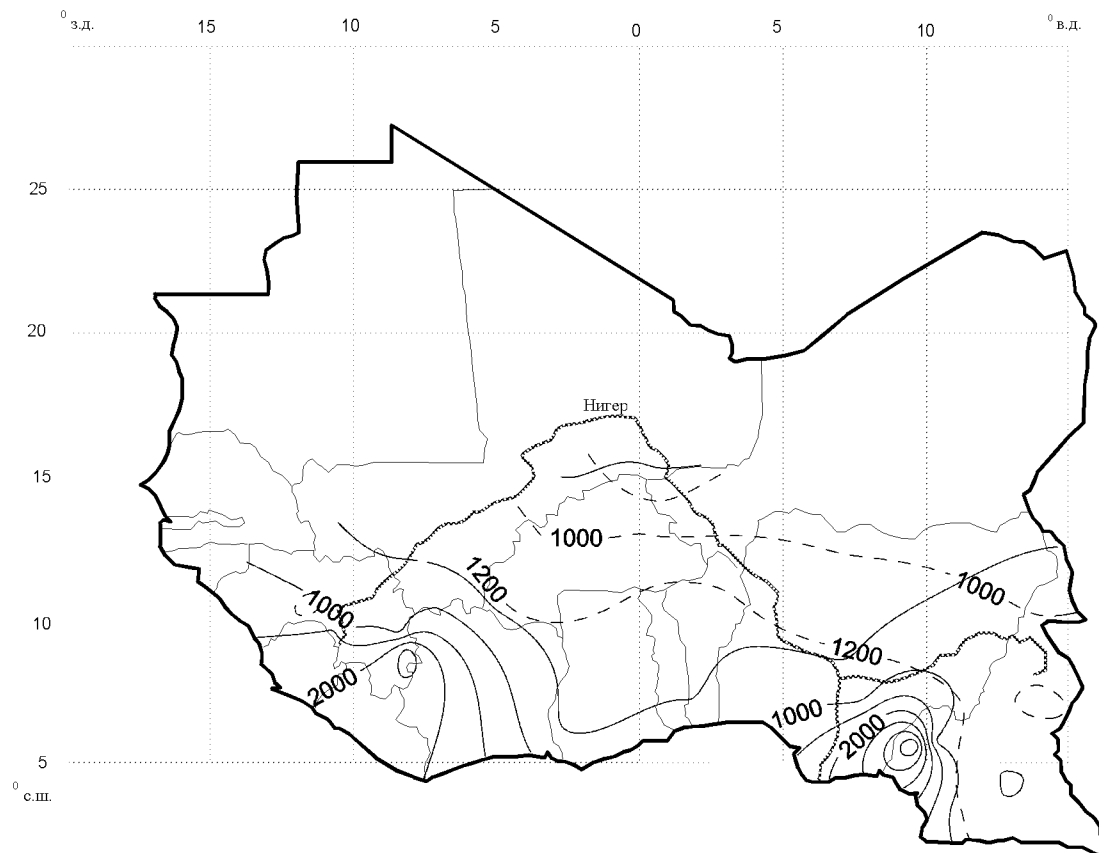


Рисунок 3.3 – Значения стока и испарения различной обеспеченности.

a)



б)



в)

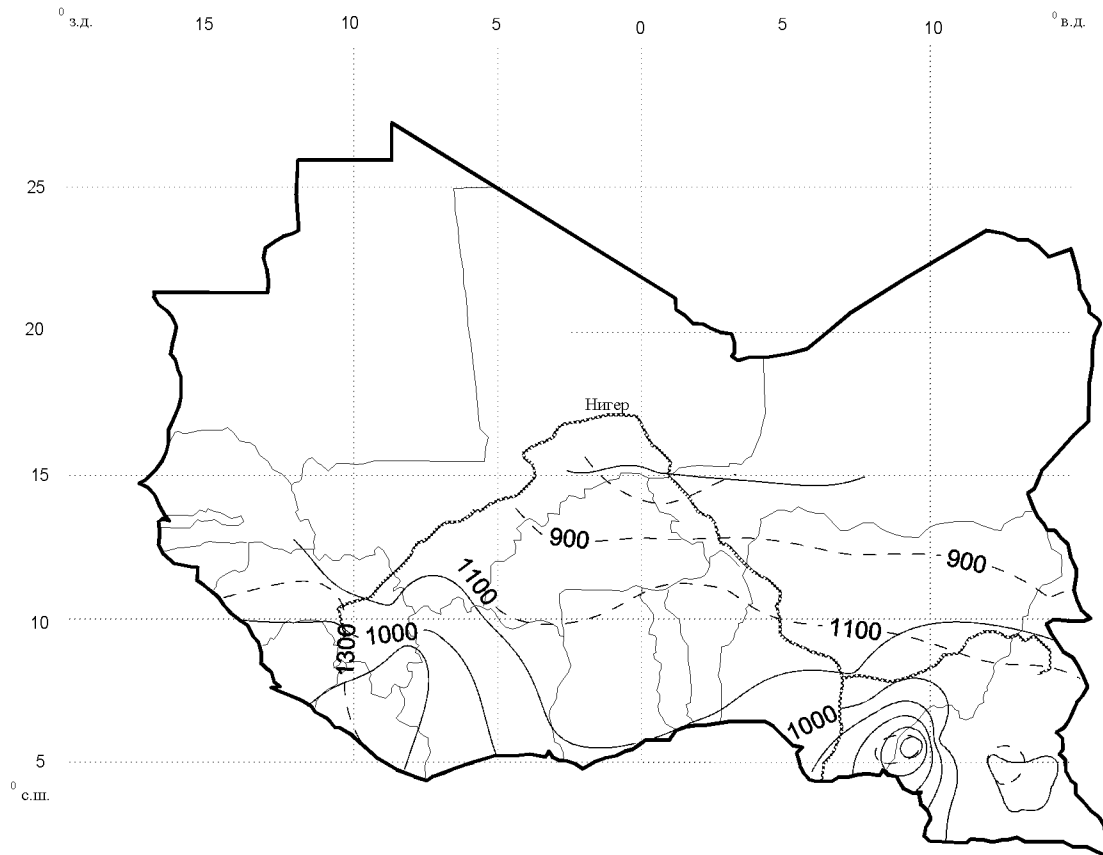


Рисунок 3.4 – Карты распределения стока (—) и испарения (---) 0,1 %-ной (а), 1 %-ной (б) и 10 %-ной (в) обеспеченности.

4 СЦЕНАРНЫЕ ОЦЕНКИ ОДНОМЕРНЫХ МНОГООБРАЗИЙ КРИВЫХ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ДЛЯ НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО СЦЕНАРИЯ

4.1 Климатические сценарии*

Потепление климатической системы является неоспоримым фактом, и начиная с 1950-х годов многие наблюдаемые изменения являются беспрецедентными в масштабах от десятилетий до тысячелетий. Произошло потепление атмосферы и океана, запасы снега и льда сократились, уровень моря повысился, концентрации парниковых газов возросли [34].

С начала 20-го века средняя приповерхностная температура выросла на 0,74 °С. Каждое из трех последних десятилетий характеризовалось более высокой температурой у поверхности Земли по сравнению с любым предыдущим десятилетием начиная с 1850 г. В Северном полушарии 1983–2012 годы были, вероятно, самым теплым 30-летним периодом за последние 1400 лет.

Ниже излагаются сведения, взятые из текста Пятого оценочного доклада [33–35].

За последние два десятилетия Гренландский и Антарктический ледниковые покровы теряли массу, ледники сокращались практически во всем мире, площадь морского льда в Арктике и весеннего снежного покрова в Северном полушарии продолжала уменьшаться. В период с 2003 по 2009 гг. ледниковый щит Гренландии потерял более 243 млрд. тонн льда, тем самым повысив уровень Мирового океана на 4 мм. Антарктический ледяной щит тает, повышая тем самым уровень Мирового океана на 0,27 мм в год. С конца 1950-х годов температура на Антарктическом полуострове повысилась на 2,5 °С.

* Раздел подготовлен в соавторстве со студентом четвертого курса РГГМУ Емельяновым Е.В. при подготовке бакалаврской работы по разделу, который консультировал (руководил в качестве педагогической практики, необходимой при обучении в аспирантуре) автор (выписка из задания на выполнение бакалаврской работы с указанием фамилии Бонгу С.Э. прилагается, Приложение Л).

Темпы повышения уровня моря с середины 19-го века превысили средние темпы за предыдущие два тысячелетия. За период 1901–2010 гг. средний глобальный уровень моря повысился на 0,19 (0,17–0,21) м. Ежегодно уровень моря повышается в среднем на 3,2 мм.

Концентрации метана, двуокиси углерода и оксидов азота в атмосфере выросли до беспрецедентных уровней, по меньшей мере, за последние 800 000 лет. Концентрации двуокиси углерода увеличились на 40 % с доиндустриального периода, в первую очередь за счет выбросов от сжигания ископаемого топлива, и, во-вторых, за счет нетто-выбросов в результате изменений в землепользовании. На поглощение океаном приходится около 30 % антропогенных выбросов двуокиси углерода, что приводит к подкислению океана. На арктическом шельфе расположены так называемые «метановые факелы», проходящие сквозь всю толщу океанической воды, и вносящие свой огромный вклад в количество парниковых газов Земли.

Оценкой изменения климата занимается Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), состоящая из 209 авторов и более чем 600 соавторов, приглашенных для написания статей, вошедших в Пятый оценочный доклад [33]. МГЭИК состоит из трех Рабочих групп. Первая занимается регистрацией, выявлением причин и анализом изменений климата, выявлением их причин. Вторая группа исследователей изучает влияние изменений климата на природу и жизнь людей, и возможность адаптации с целью минимизации неблагоприятных последствий. Третья группа исследует возможности снижения антропогенного воздействия на климатическую систему (прежде всего, снижения выбросов парниковых газов).

Пятый оценочный доклад был подготовлен в 2013 г. Он содержит глобальную оценку изменения климата, выводы из которой констатируют, что в настоящее время с 95%-й достоверностью антропогенное влияние является доминирующей причиной потепления, наблюдаемого с середины 20-го века. Пятый доклад МГЭИК базируется на Четвертом оценочном докладе, вышедшем в 2007 г., но включает в себя новые выводы из Специального докла-

да по управлению рисками экстремальных явлений и бедствий для содействия адаптации к изменению климата, а также из данных исследований, опубликованных в обширной научно-технической литературе.

МГЭИК собирает и обрабатывает глобальные климатические модели как часть оценочного доклада. Совокупность моделей называется *Climate Model Intercomparison Project (CMIP)*. Так, в Четвертом оценочном докладе использовалась глобальная модель *CMIP3*, выпущенная в 2007 г., в Пятом оценочном докладе же используется модель *CMIP5*, вобравшая в себя большее количество моделей и метаданных, описывающих симуляцию моделей, а следовательно, более усовершенствованная [36].

Также, существенным отличием *CMIP5* от *CMIP3* является новый представленный набор сценариев (*Representative Concentration Pathways (RCP)*). Эти сценарии охватывают широкий диапазон вероятных сценариев радиационного воздействия, как следствие – парникового эффекта. *RCP*-сценарии включают в себя очень низкий сценарий (*RCP2.6*), два сценария стабилизации (*RCP4.5* и *RCP6*), и очень высокий базовый сценарий выбросов в атмосферу (*RCP8.5*). Последний подразумевает отсутствие сокращения выбросов в атмосферу, и представляет собой неспособность предотвратить глобальное потепление к 2100 году. Сценарии определяются приблизительной суммарной величиной радиационного воздействия в 2100 г. по сравнению с 1750 г.: 2,6 Вт*м⁻² для *RCP2.6*; 4,5 Вт*м⁻² для *RCP4.5*; 6,0 Вт*м⁻² для *RCP6* и 8,5 Вт*м⁻² для *RCP8.5*. Согласно *RCP6* и *RCP8.5*, радиационное воздействие достигает максимального значения к 2100 г.; в *RCP2.6* оно достигает максимума и затем снижается; в *RCP4.5* оно стабилизируется к 2100 г. [33, 35].

Поясняющая информация представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные данные для набора сценариев *RCP* [33]

| Сценарий | CO ₂ | Использование пахотных земель и пастбищ | Зависимость от ископаемого топлива | Выбросы метана | Население |
|---------------|-----------------------------------|---|------------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| <i>RCP8,5</i> | Увеличение в 3 раза | Увеличение использования | Сильная | Быстрое увеличение числа значений | Более 12 млрд. |
| <i>RCP6</i> | Увеличение на 25% | Увеличение использования | Сильная | На уровне нынешних значений | ~10 млрд. |
| <i>RCP4,5</i> | Слабое увеличение | Снижение использования | Слабая | На уровне нынешних значений | ~10 млрд. |
| <i>RCP2,6</i> | Уменьшение ниже нынешних значений | Снижение использования | Нет | Понижение числа выбросов на 40% | Менее 9 млрд. |

Так как сценарии *RCP2.6* и *RCP8.5* дают сильные отклонения от нынешних значений, в данном случае логично воспользоваться сценарием стабилизации (*RCP4.5*).

Выбор модели для оценки водных ресурсов

В каждом сценарии есть разработанные модели. Разработчики и модели показаны в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Модели Пятого оценочного доклада [33]

| Название модели | Институт |
|---|--|
| <i>ACCESS1.0, ACCESS1.3</i> | <i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology (BOM), Australia</i> |
| <i>BCC-CSM1.1, BCC- CSM1.1-M</i> | <i>Beijing Climate Center, China Meteorological Administration</i> |
| <i>BNU-ESM</i> | <i>College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University</i> |
| <i>CanESM2</i> | <i>Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis</i> |
| <i>CCSM4</i> | <i>National Center for Atmospheric Research, USA</i> |
| <i>CESM1(BGC), CESM1(CAM5), CESM1(WACM)</i> | <i>Community Earth System Model Contributors, USA</i> |
| <i>CMCC-CM</i> | <i>Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici, Italy</i> |
| <i>CNRM-CM5</i> | <i>Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique, France</i> |
| <i>CSIRO-Mk3.6.0</i> | <i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization / Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia</i> |
| <i>FGOALS-g2</i> | <i>LASG, Institute of Atmospheric</i> |

| Название модели | Институт |
|---|--|
| | <i>Physics, Chinese Academy of Sciences and CESS, Tsinghai University</i> |
| <i>FIO-ESM</i> | <i>The First Institute of Oceanography, SOA, China</i> |
| <i>GISS-E2-R</i> | <i>NASA Goddard Institute for Space Studies, USA</i> |
| <i>HadGEM2-AO</i> | <i>National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration</i> |
| <i>HadGEM2-CC, HadGEM2-ES</i> | <i>Met Office Hadley Centre, United Kingdom</i> |
| <i>INM-CM4</i> | <i>Institute for Numerical Mathematics, Russia</i> |
| <i>IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, IPSL-CM5B-LR</i> | <i>Institut Pierre-Simon Laplace, France</i> |
| <i>MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5</i> | <i>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies</i> |
| <i>MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR</i> | <i>Max Planck Institute for Meteorology, Germany</i> |
| <i>MRI-CGCM3</i> | <i>Meteorological Research Institute, Japan</i> |
| <i>NorESM1-M, NorESM1-ME</i> | <i>Norwegian Climate Centre</i> |

Всего в совокупность моделей *CMIP5* входят 39 глобальных моделей. В таких моделях решаются уравнения динамики атмосферы и океана с шагом по пространству порядка 1–2 градусов и с шагом по времени несколько минут. В данных моделях стараются наиболее полно и точно учесть все многообразие явлений и процессов, которые образуют вместе климатическую систему. Это, например, накопление и таяние снега, таяние, намерзание и движения морского льда, эволюция мерзлоты в почве, речной сток, влияние растений на потоки тепла и импульса, и другие. Все больше моделей включают в себя расчет эволюции углерода растений, почвы и океана, которые в свою очередь позволяют оценить концентрацию углекислого газа в атмосфере. Многие модели учитывают также химические превращения малых газовых составляющих атмосферы, таких как водяной пар, метан, оксид углерода. Около половины моделей атмосферы имеют горизонтальное разрешение приблизительно 150 км (в *CMIP3* была лишь одна такая модель). Это дает более точную и полноценную оценку всех факторов.

Для сценария умеренного антропогенного воздействия *RCP4.5* разработано 32 модели, для сценария *RCP6* – 17. Участвующие в *CMIP5* модели различаются, прежде всего, шагом сетки. Так, в атмосфере типичный шаг сетки составляет 2–3 градуса, но в некоторых моделях (например, японская модель *MRI-AM*) он равен 20 км. Однако такие модели пока могут использоваться лишь для проведения отдельных коротких численных экспериментов. Расчеты на несколько сотен лет по ним практически невозможны. В океане также типичный шаг сетки составляет 1–2 градуса, но некоторые модели (к примеру, английская модель *HadGEM*) используют шаг сетки 0,3 градуса. Обмен информацией между моделями атмосферы и океана происходит каждые 3 часа модельного времени. Этот промежуток служит также и численным шагом модели океана. Пересчет полей с атмосферной на океаническую пространственные сетки происходит методом линейной интерполяции. В модели *INM-CM4* при стыковке атмосферной и океанической моделей не используется коррекция потоков тепла и импульса, коррекция потока пресной

воды применяется лишь в Баренцевом, Карском, Норвежском и Гренландском морях. Такая коррекция не влияет непосредственно на такие характеристики гидрологического цикла, как речной сток, осадки и т.п.

Главной особенностью модели *MPI-ESM* является объединенный углеродный цикл, который позволяет изучать взаимосвязь и последствия изменения климата, отраженные в самом углеродном цикле. Другими словами, изменение климата влияет на углеродный цикл так же, как и углеродный цикл влияет на изменение климата.

Кроме того, модели могут включать (или не включать) в себя интерактивный расчет тропосферной и стратосферной химии, углеродного цикла, биохимии океана. Кроме этих простых формальных критериев, модели различаются также по качеству воспроизведения различных климатических характеристик. Это качество зависит, кроме перечисленного, от точности настройки модели, то есть степени взаимосогласованности описания всех процессов. Модель должна адекватно описывать многие явления современного климата, а также правильно воспроизводить изменения климата, наблюдавшиеся в 19, 20 и начале 21-го века [37]. В таблице 4.3 представлены численные значения шагов атмосферной и океанической сеток различных моделей Пятого оценочного доклада.

Если в полях океанической сетки указаны координаты i и j , то их необходимо указывать вручную, что сказывается на точности модели.

Таблица 4.3 – Численные значения атмосферной и океанической сеток [38]

| Модель | Атмосферная сетка | | Океаническая сетка | |
|----------------------|-------------------|------------|--------------------|------------|
| | Широта, ° | Долгота, ° | Широта, ° | Долгота, ° |
| <i>ACCESS 1.0</i> | 1,25 | 1,875 | (i,j) | (i,j) |
| <i>ACCESS 1.3</i> | 1,25 | 1,875 | (i,j) | (i,j) |
| <i>BCC-CSM1.1</i> | 2,7906 | 2,8125 | 0.3333 | 1 |
| <i>BCC-CSM1.1(m)</i> | 2,7906 | 2,8125 | 0.3333 | 1 |

| Модель | Атмосферная сетка | | Океаническая сетка | |
|----------------------|-------------------|------------|--------------------|--------------|
| | Широта, ° | Долгота, ° | Широта, ° | Долгота, ° |
| <i>BNU-ESM</i> | 2,7906 | 2,8125 | 0.3344 | 1 |
| <i>CCSM4</i> | 0.9424 | 1,25 | <i>(i,j)</i> | <i>(i,j)</i> |
| <i>CESM1(BGC)</i> | 0.9424 | 1,25 | <i>(i,j)</i> | <i>(i,j)</i> |
| <i>CESM1(CAM5)</i> | 0.9424 | 1,25 | <i>(i,j)</i> | <i>(i,j)</i> |
| <i>CESM1(WACCM)</i> | 1,8848 | 2,5 | <i>(i,j)</i> | <i>(i,j)</i> |
| <i>CFSv2-2011</i> | 1 | 1 | 0.5 | 0.5 |
| <i>CMCC-CESM</i> | 3,4431 | 3,75 | <i>(i,j)</i> | <i>(i,j)</i> |
| <i>CMCC-CM</i> | 0.7484 | 0.75 | <i>(i,j)</i> | <i>(i,j)</i> |
| <i>CMCC-CMS</i> | 3,7111 | 3,75 | <i>(i,j)</i> | <i>(i,j)</i> |
| <i>CNRM-CM5</i> | 1,4008 | 1,4063 | <i>(i,j)</i> | <i>(i,j)</i> |
| <i>CNRM-CM5-2</i> | 1,4008 | 1,4063 | <i>(i,j)</i> | <i>(i,j)</i> |
| <i>CSIRO-Mk3.6.0</i> | 1,8653 | 1.875 | 0.9327 | 1.875 |
| <i>CanCM4</i> | 2,7906 | 2,8125 | 0.9303 | 1,4063 |
| <i>CanESM2</i> | 2,7906 | 2,8125 | 0.9303 | 1,4063 |
| <i>EC-EARTH</i> | 1.1215 | 1.125 | <i>(i,j)</i> | <i>(i,j)</i> |
| <i>FGOALS-g2</i> | 2,7906 | 2,8125 | 0.5 | 1 |
| <i>FGOALS-gl</i> | 4.1026 | 5 | 1 | 1 |
| <i>GFDL-CM2.1</i> | 2.0225 | 2,5 | 0.3344 | 1 |
| <i>GFDL-CM3</i> | 2 | 2,5 | 0.3344 | 1 |
| <i>GFDL-ESM2G</i> | 2.0225 | 2 | 0.375 | 1 |
| <i>GFDL-ESM2M</i> | 2.0225 | 2,5 | 0.3344 | 1 |
| <i>GISS-E2-H</i> | 2 | 2,5 | 1 | 1 |
| <i>GISS-E2-H-CC</i> | 2 | 2,5 | 1 | 1 |
| <i>GISS-E2-R-CC</i> | 2 | 2,5 | 1 | 2,5 |
| <i>HadCM3</i> | 2,5 | 3,75 | 2,5 | 2,5 |
| <i>HadGEM2-AO</i> | 1,25 | 1.875 | 0.3396 | 1 |

| Модель | Атмосферная сетка | | Океаническая сетка | |
|---------------------|-------------------|------------|--------------------|------------|
| | Широта, ° | Долгота, ° | Широта, ° | Долгота, ° |
| <i>HadGEM2-CC</i> | 1,25 | 1.875 | 0.3396 | 1 |
| <i>HadGEM2-ES</i> | 1,25 | 1.875 | 0.3396 | 1 |
| <i>INM-CM4</i> | 1,5 | 2 | 0.5 | 1 |
| <i>IPSL-CM5A-LR</i> | 1,8947 | 3,75 | (i,j) | (i,j) |
| <i>IPSL-CM5A-MR</i> | 1,2676 | 2,5 | (i,j) | (i,j) |
| <i>IPSL-CM5B-LR</i> | 1,8947 | 3,75 | (i,j) | (i,j) |
| <i>MIROC-ESM</i> | 2,7906 | 2,8125 | 0.5582 | 1,4063 |
| <i>MIROC4h</i> | 0.5616 | 0.5625 | 0.1875 | 0.2813 |
| <i>MIROC5</i> | 1,4008 | 1,4063 | 0.5 | 1,4063 |
| <i>MPI-ESM-LR</i> | 1,8653 | 1.875 | (i,j) | (i,j) |
| <i>MPI-ESM-P</i> | 1,8653 | 1.875 | (i,j) | (i,j) |
| <i>MRI-CGCM3</i> | 1.1215 | 1.125 | 0.5 | 1 |
| <i>MRI-ESM1</i> | 1.1215 | 1.125 | 0.5 | 1 |
| <i>NorESM1-M</i> | 1,8947 | 2,5 | (i,j) | (i,j) |

На рисунке 4.1 приведена оценка качества моделей при воспроизведении современного климата. Мерой ошибки является среднеквадратическое отклонение (СКО), которое, рассматривая каждую переменную по отдельности, изображается в виде относительной погрешности путем нормализации результата медианных погрешностей всех результатов модели. Например, значение 0,2 указывает на то, что СКО модели на 20% больше, чем средняя ошибка *CMIP5* для этой переменной, в то время как значение $-0,2$ означает ошибку на 20% меньше, чем средняя ошибка.

По левой оси изображены такие предикторы, как прямая длинноволновая (*LW CRE*) и коротковолновая (*SW CRE*) радиация, суммарная длинноволновая (*RLUT*) и коротковолновая (*RSUT*) радиация, осадки (*PR*), температура воздуха на высоте 2 м над уровнем моря (*TAS*), высота над уровнем моря

(ZG), северный ветер (VA), восточный ветер (UA), температура атмосферы (TA).

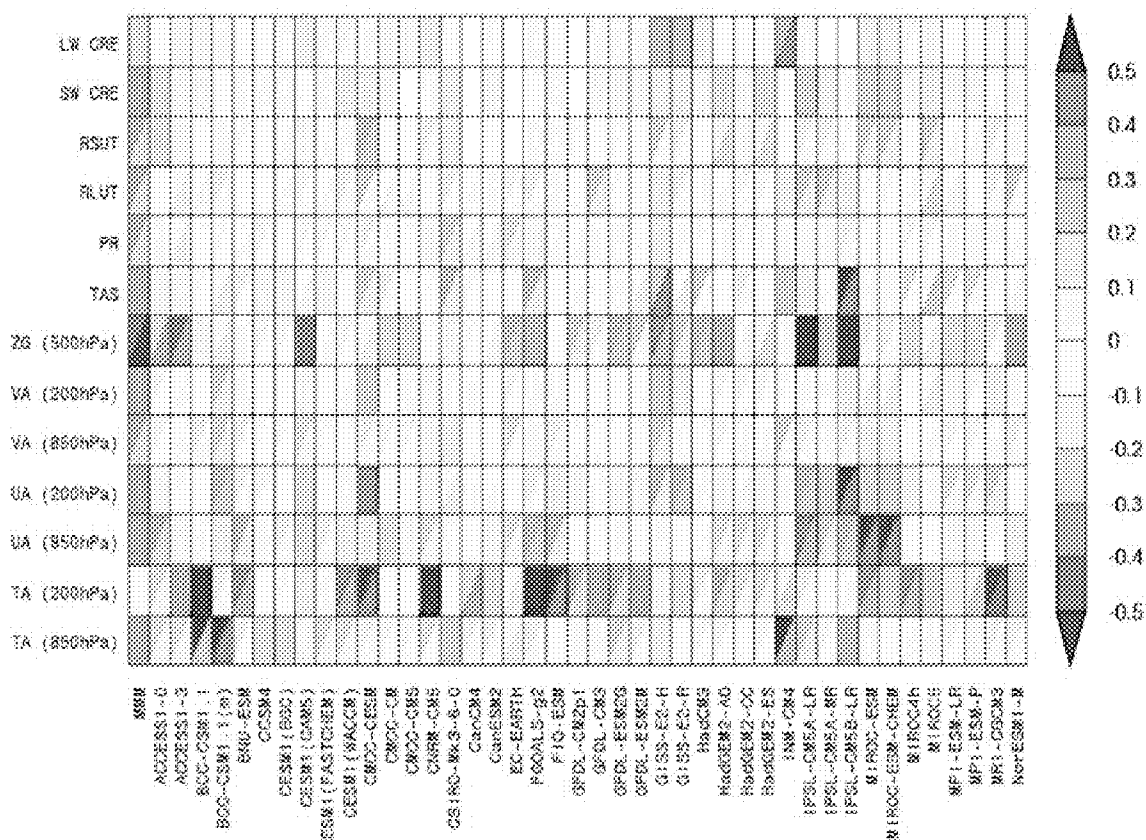


Рисунок 4.1 – Диаграмма оценки качества моделей [39].

На рисунках 4.2, 4.3, и 4.4 показано изменение температуры приповерхностного воздуха к 2074 году по сравнению с 2004 годом при условии развития сценария *RCP4.5* по данным трех моделей: модели Центра климатических прогнозов и исследований Хэдли *HadGEM2-ES*, ансамбля моделей 5-го оценочного доклада и модели института Макса Планка *MPI-ESM-LR*.

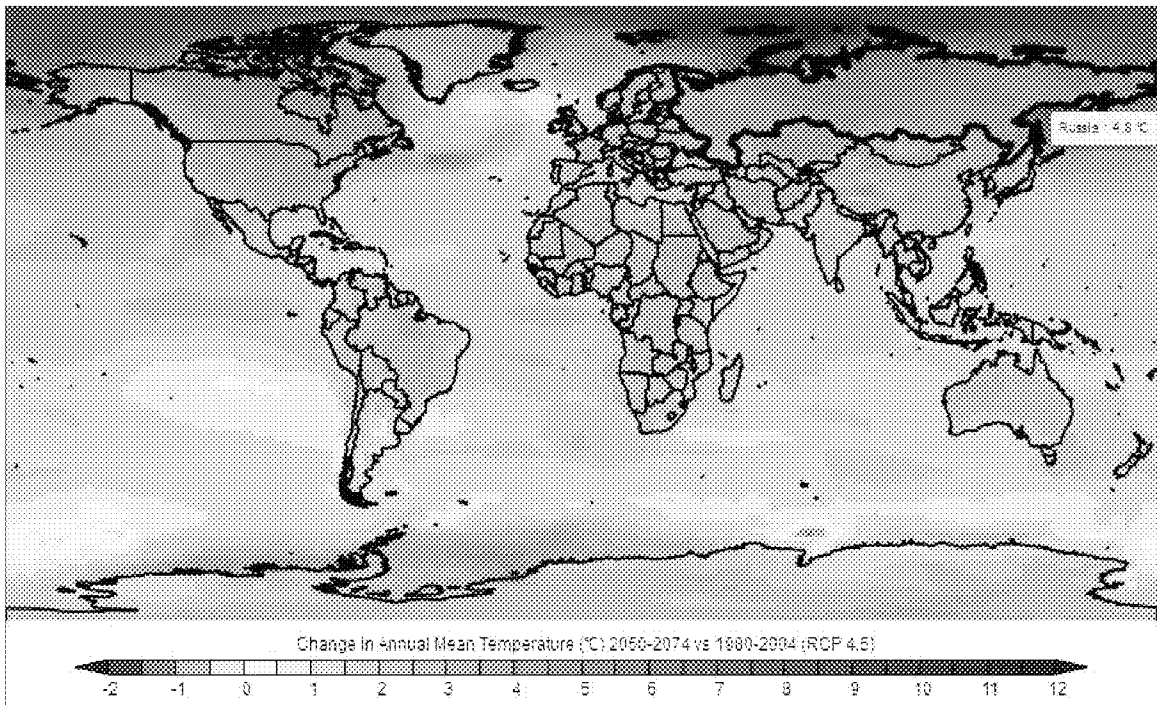


Рисунок 4.2 – Изменение температуры по данным модели *HadGEM2* [33].

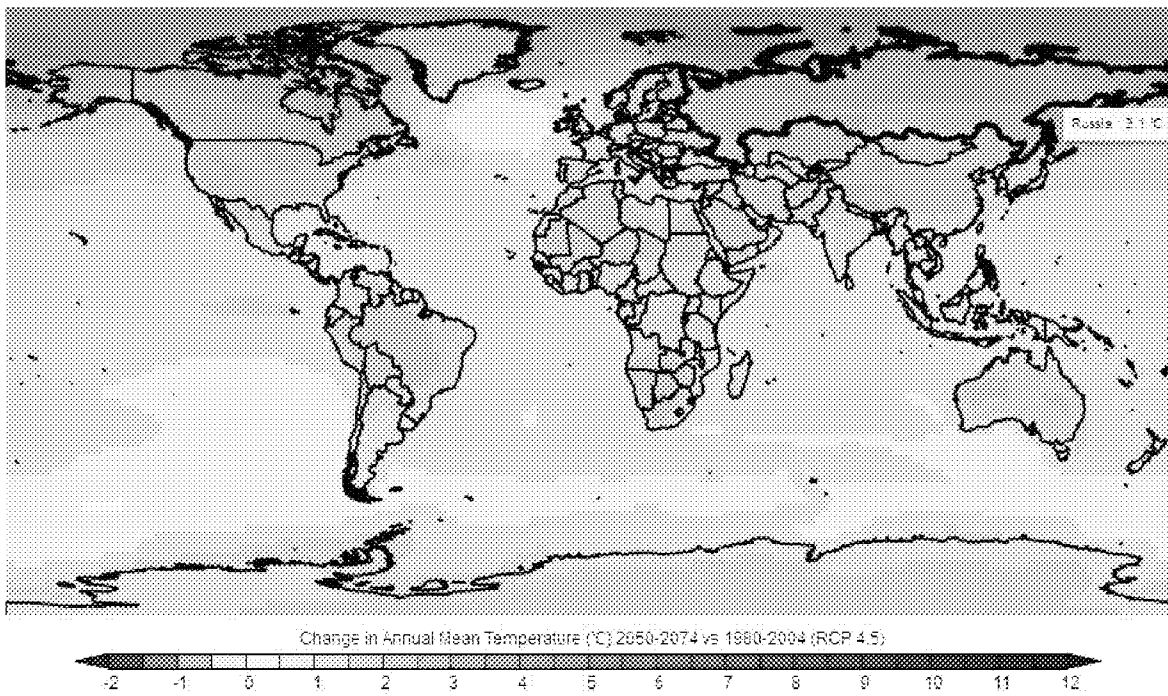


Рисунок 4.3 – Изменение температуры по данным ансамбля моделей 5-го доклада [33].

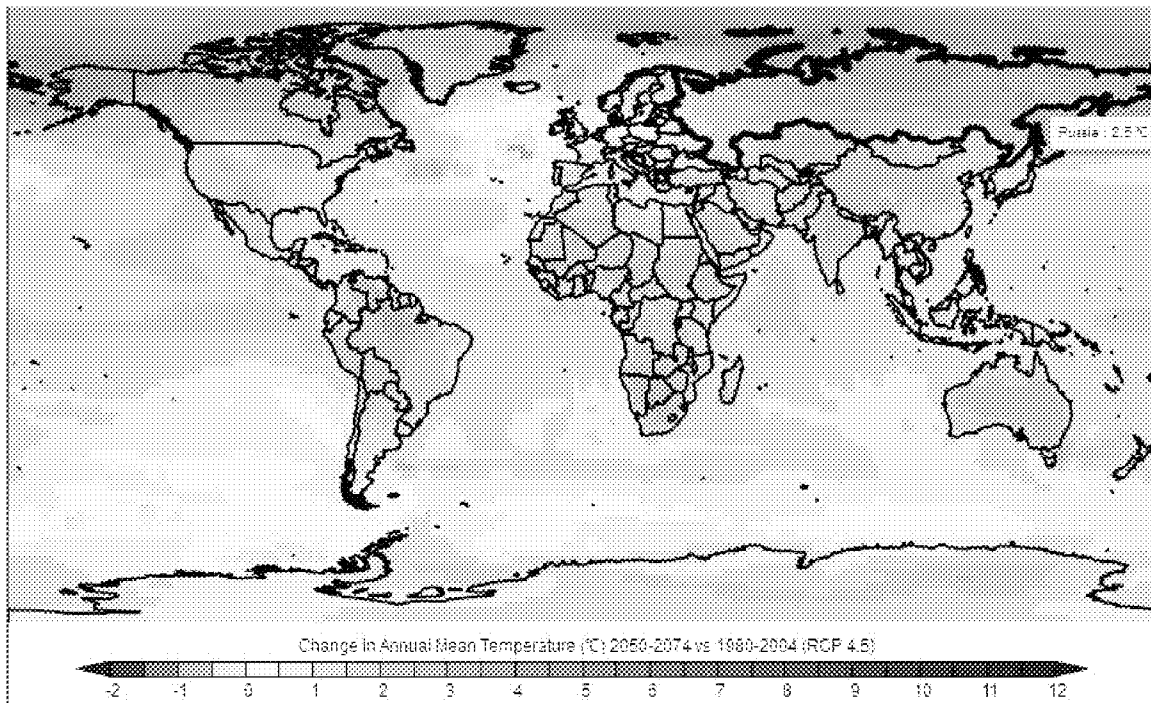


Рисунок 4.4 – Изменение температуры по данным модели *MPI-ESM-LR* [33].

Таким образом, выбраны наиболее подходящие модели, освещающие весь диапазон возможного повышения температуры приповерхностного воздуха (ΔT) при условиях сценария *RCP4.5*: ансамбль моделей 5-го оценочного доклада *ensemble* ($\Delta T = 3,1$ °C), модель Центра климатических прогнозов и исследований Хэдли (Великобритания) *HadGEM2-ES* ($\Delta T = 4,8$ °C) и модель Института Макса Планка *MPI-ESM-LR* ($\Delta T = 2,5$ °C).

На рисунке 4.5 показаны прогнозные значения метеоэлементов, отнесенные к центрам водосборов Западной Африки (по оси *x* номера станций, см. таблицу 1.1), по выбранным моделям на периоды 2016 – 2055 гг. и 2045 – 2065 гг. На графиках показаны, также фактические величины элементов. Основные тенденции такие: большие температуры прогнозируются по модели *HadGEM2-ES*, а по модели *MPI-ESM-LR* прогнозируются меньшее количество осадков по всей Западной Африке.

На диаграммах 4.5, *в*, *г* видно, что есть водосборы, на которых прогнозируется очень малое количество осадков. Это водосборы с номерами 19, 21, 23 – 26, центры которых находятся на севере Буркина-Фасо. Подобные зна-

чения могут сказаться в дальнейшем при построении карт, так как, вероятно, будут «стягивать» вокруг себя изолинии.

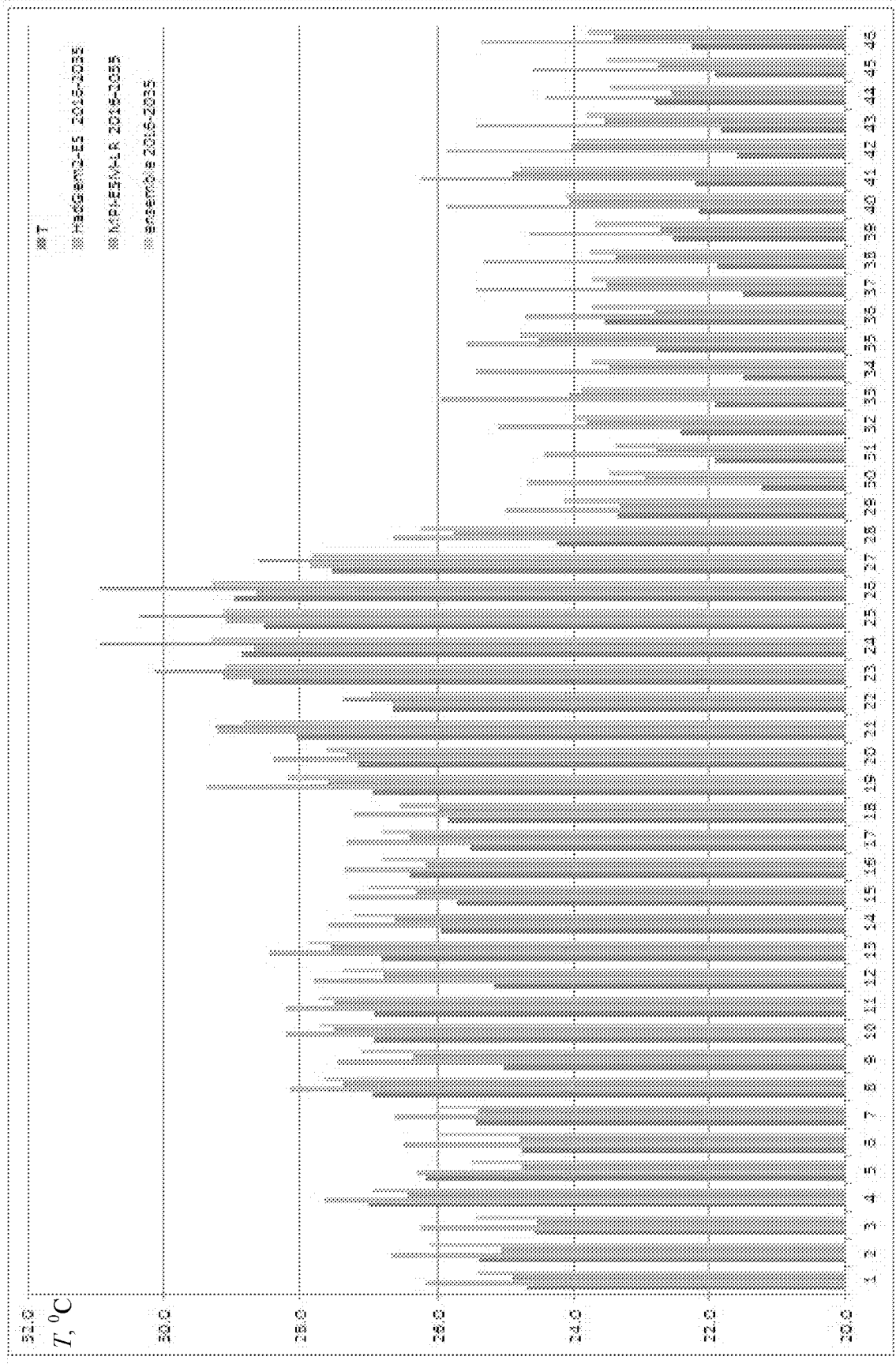
В таблице 4.4 приведена сводная (средняя) информация по рассматриваемой территории (знак «минус» означает увеличение сценарной оценки).

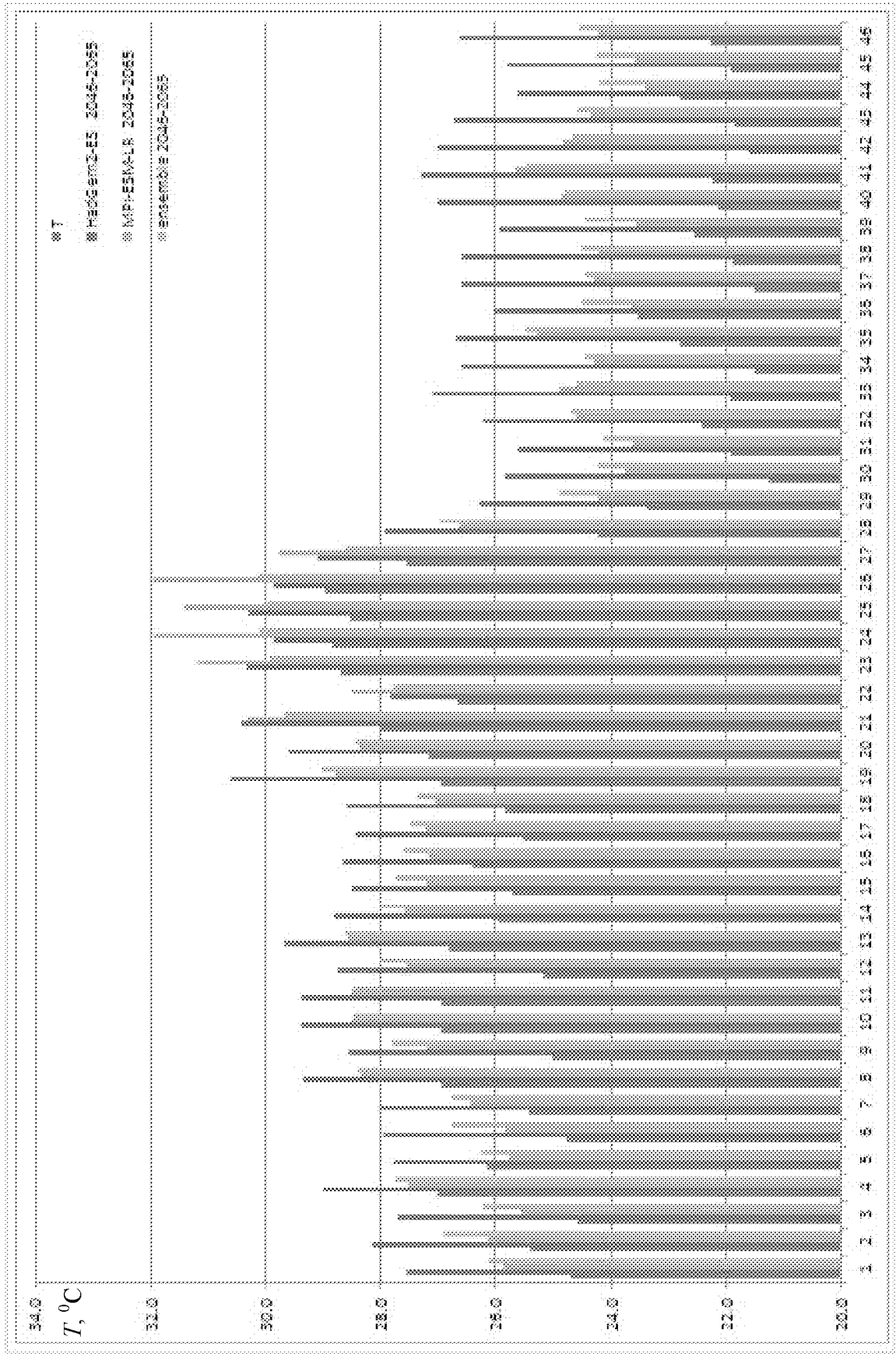
Получается, что модель *HadGem2-ES* дает значительное изменение температуры, но не малое изменение осадков от одного периода к другому. Такая же ситуация с моделью *MPI-ESM-LR*, по ней произойдет меньшее изменение температуры по сравнению с моделью Хэдли. Ансамблевая модель, по описанию дающая осредненные оценки по всем моделям, для двух периодов 2016–2035 и 2046–2065 гг. для Западной Африки близка к модели Института Макса Планка.

Таблица 4.4 – Осредненная по территории сценарная метеоинформация

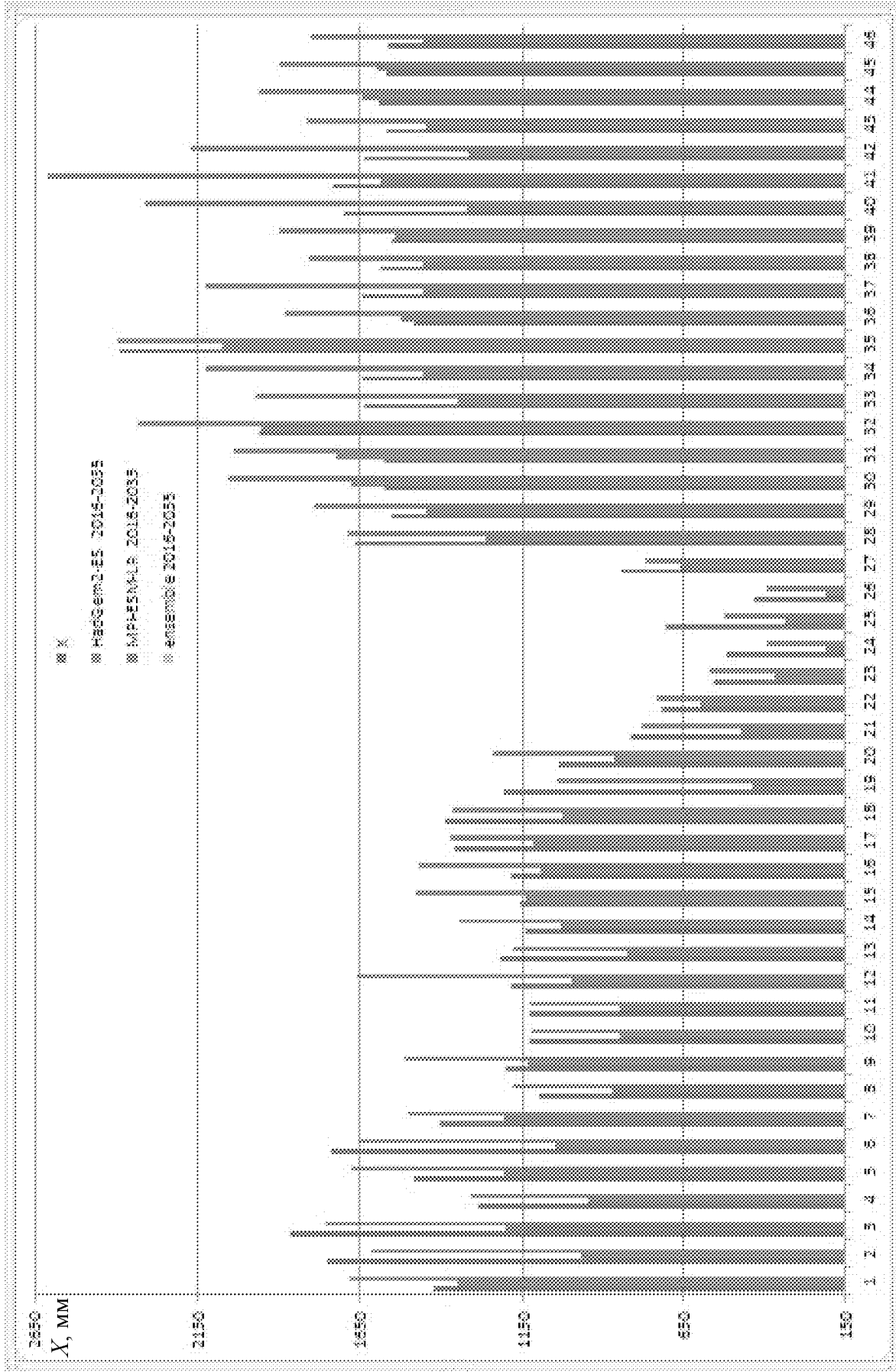
| Модель / период, гг. | Относительное отклонение средней температуры, % | Разница средних температур, °С | Относительное отклонение средних осадков, % | Разница средних значений осадков, мм |
|-------------------------------|---|--------------------------------|---|--------------------------------------|
| <i>HadGem2-ES</i> / 2016–2035 | –8 | –1,9 | 16 | 224 |
| <i>HadGem2-ES</i> / 2046–2065 | –13 | –3,2 | 17 | 230 |
| <i>MPI-ESM-LR</i> / 2016–2035 | –4 | –0,9 | –14 | –185 |
| <i>MPI-ESM-LR</i> / 2046–2065 | –7 | –1,8 | –15 | –210 |
| <i>ensemble</i> / 2016–2035 | –5 | –1,2 | – | – |
| <i>ensemble</i> / 2046–2065 | –8 | –1,9 | –17 | –231 |

a)





6)



2)

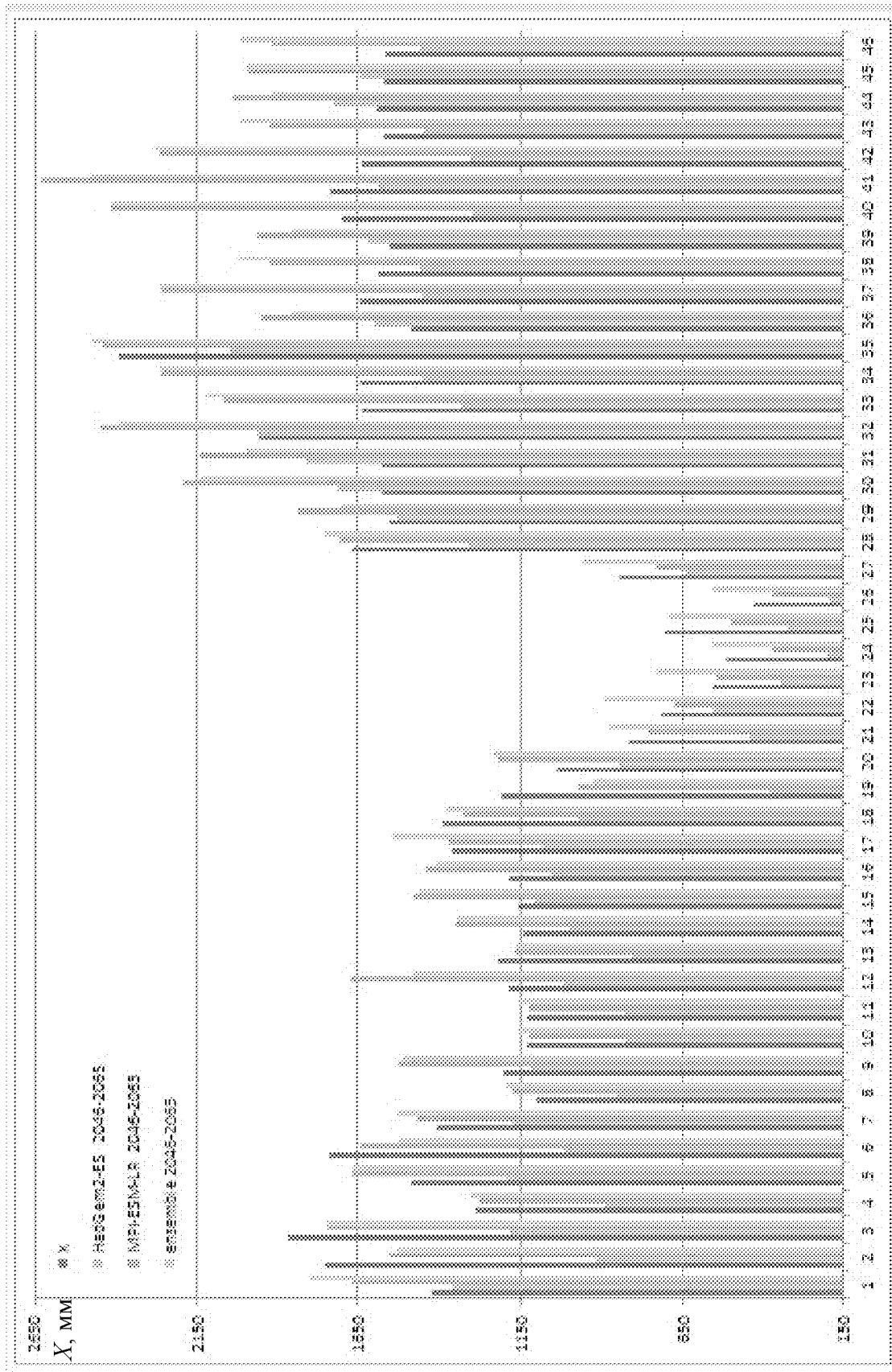


Рисунок 4.5 – Прогнозные значения метеоэлементов по выбранным моделям на периоды 2016 – 2035 гг. (а, б) и 2046 – 2065 гг. (в, г).

4.2 Сценарные одномерные многообразия

Методология сценарной оценки

Методология сценарной оценки стока является достаточно апробированной и подробно изложена, например, в работах [21, 41]. Методология оценки испарения подобна таковой для стока, является частично апробированной для условий Африки и описана в работе [8]. Далее изложены только основные расчетные выражения применяемой методики.

В основе методики лежит уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова, которое аппроксимируется системой уравнений для начальных моментов m_n ($n = \overline{1,4}$) (2.3) (повторим ее здесь):

$$\begin{aligned}dm_1/dt &= -(\bar{c} - 0,5G_{\tilde{c}})m_1 - 0,5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N}; \\dm_2/dt &= -2(\bar{c} - G_{\tilde{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}}; \\dm_3/dt &= -3(\bar{c} - 1,5G_{\tilde{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1; \\dm_4/dt &= -4(\bar{c} - 2G_{\tilde{c}})m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2,\end{aligned}$$

где $c = 1/(k\tau) = \bar{c} + \tilde{c}$; $\bar{N} = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$;

\bar{c} и \bar{N} – математические ожидания;

\tilde{c} и \tilde{N} – белые шумы с интенсивностями $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$;

k – коэффициент стока;

τ – время релаксации бассейна.

Данной системы уравнений достаточно для определения таких расчетных гидрологических характеристик как норма $\bar{Q} = m_1$, коэффициентов вариации $C_v = f(m_1, m_2)$, асимметрии $C_s = f(m_1, m_2, m_3)$ и эксцесса

$Eh = f(m_1, m_2, m_3, m_4)$. Для упрощения системы приводятся следующие доводы:

а) четвертый момент m_4 на практике не используется; б) для m_3 неустойчи-

вость возникает при $G_{\bar{c}}/\bar{c} = 0,67$, что имеет место почти на всем Африканском континенте [42], поэтому в отношении коэффициента асимметрии целесообразнее выбрать соотношение C_s/C_v , соответствующие существующему климату, чем рассчитывать (прогнозировать) его отдельно; в) в климатических сценариях выделяется многолетний временной промежуток и для него указываются характеристики метеозаэментов; в данной работе это периоды с 2016 по 2035 и с 2046 по 2065 года. Для каждого интервала процесс формирования многолетнего стока можно рассматривать как статистически стационарный, т. е. можно считать, что $dm_i/dt \approx 0$.

После принятых упрощений система (2.3) сводится к двум алгебраическим уравнениям для m_1 и m_2 , в которых присутствует только параметры $a = 2\bar{N}/2\bar{c}$ и $b_0 = -G_{\bar{N}}/2\bar{c}$:

$$-\bar{c}m_1 + \bar{N} = 0; \tag{4.1}$$

$$-2\bar{c}m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\bar{N}} = 0.$$

Так как для многолетних видов стока $\tau = 1$, то $\bar{c} = 1/\bar{k}$, $\bar{N} = \bar{X}$.

Порядок расчета следующий:

– зная по рассчитанные по фактическим рядам значения m_1 , m_2 и \bar{X} находят \bar{c} и $G_{\bar{N}}$;

– затем определяется прогнозное значение коэффициента стока k . Для этого используется выражение $k = \bar{Q}/\bar{X} = 1 - \bar{E}/\bar{X}$, полученное из уравнения водного баланса для замкнутых речных водосборов ($\bar{Q} = \bar{X} - \bar{E}$). Коэффициент стока связывается с параметрами, фигурирующими в климатических сценариях ($\bar{T}, ^\circ C$ и \bar{X}), путем использования формулы Н.А. Багрова ($E = f(\bar{X}, E_0)$, E_0 – испаряемость) и Л. Тюрка ($E_0 = f(T)$):

$$k = 1 - \text{th}((300 + 25\bar{T} + 0,05\bar{T}^3) / \bar{X}); \quad (4.2)$$

– затем, меняя в соответствии с климатическим сценарием (моделью) значения $c(\dot{X}, T)$ и $N(\dot{X})$, находим сценарные значения моментов $m_i^{\text{пр}}$, по которым и вычисляются прогнозные характеристики.

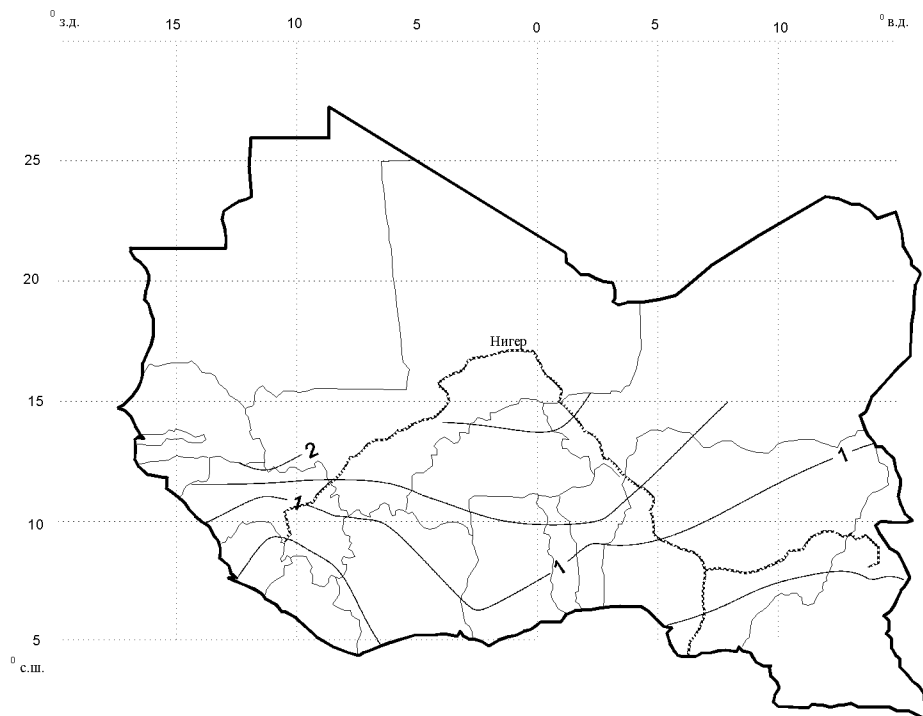
Сценарные оценки стока и испарения

По изложенной выше методике были получены сценарные значения стока и испарения: норма, коэффициент вариации и асимметрии. На рисунке 4.6 показано распределение этих характеристик по территории Западной Африки по модели Института Макса Планка (*MPI-ESM-LR*). На рисунке 4.7 показано отклонение прогнозных значений от фактических, определенное по формуле $\text{откл.} = (\text{факт} - \text{прогн.}) / \text{факт.} * 100\%$. Остальные карты в Приложении К.

a)



б)



б)

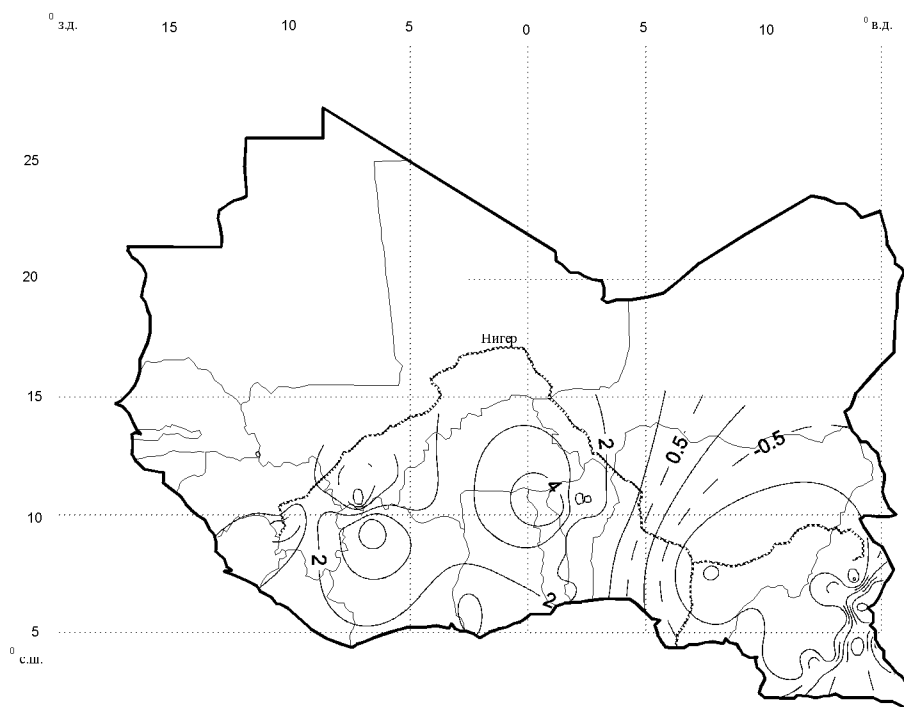
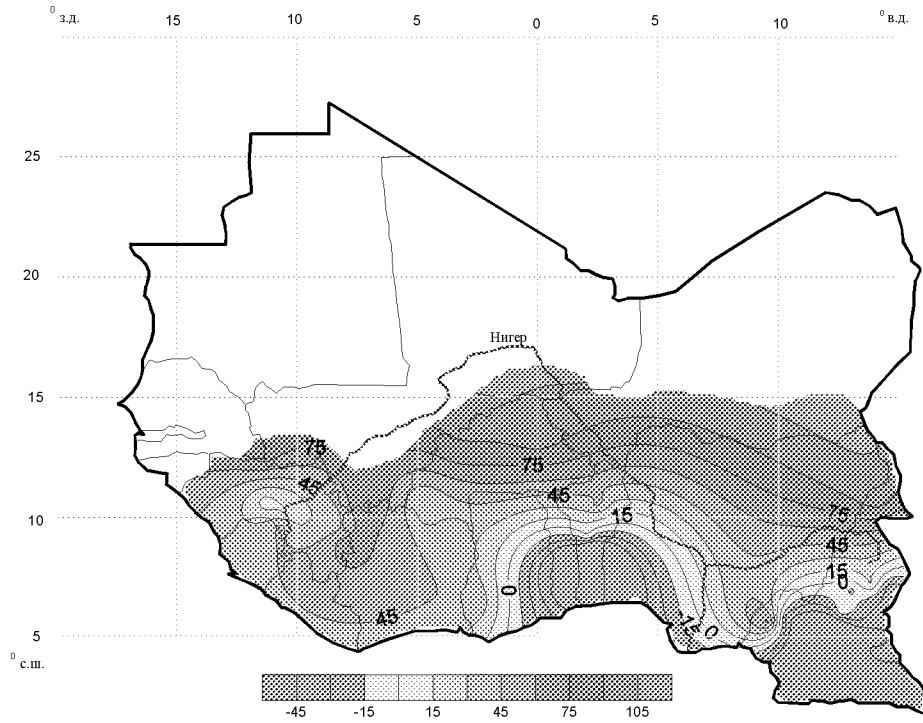


Рисунок 4.6 – Распределение по территории прогнозной нормы стока (а), коэффициентов вариации (б) и асимметрии (в) по модели *MPI-ESM-LR* на период с 2016 по 2035.

a)



b)

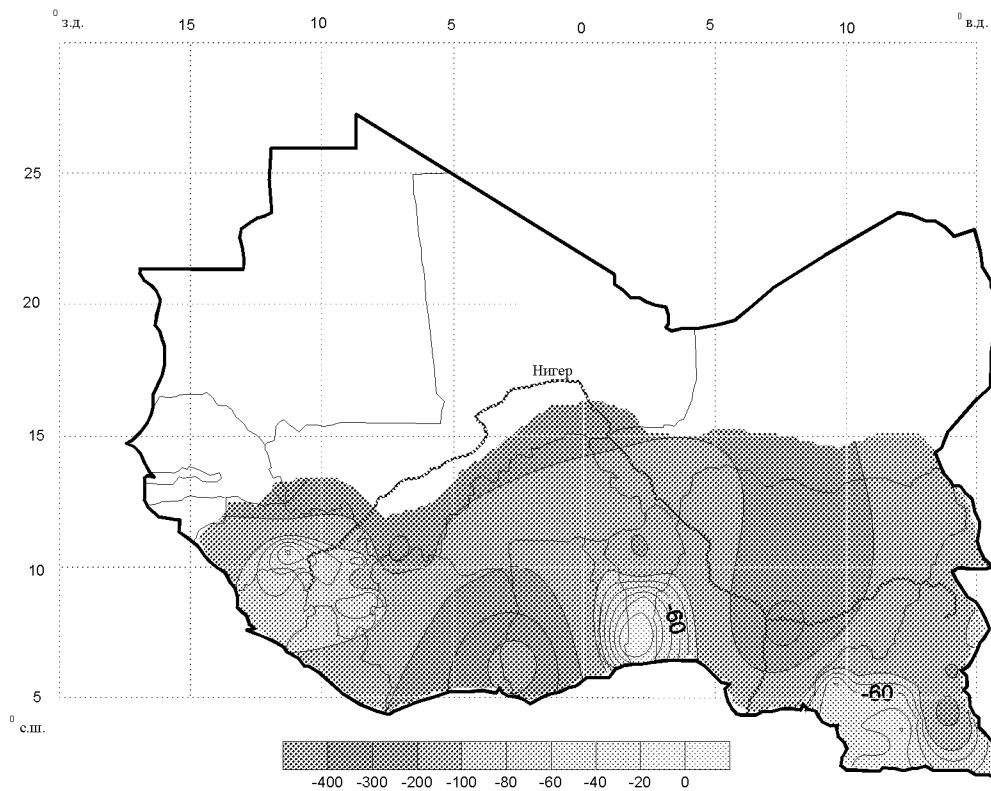
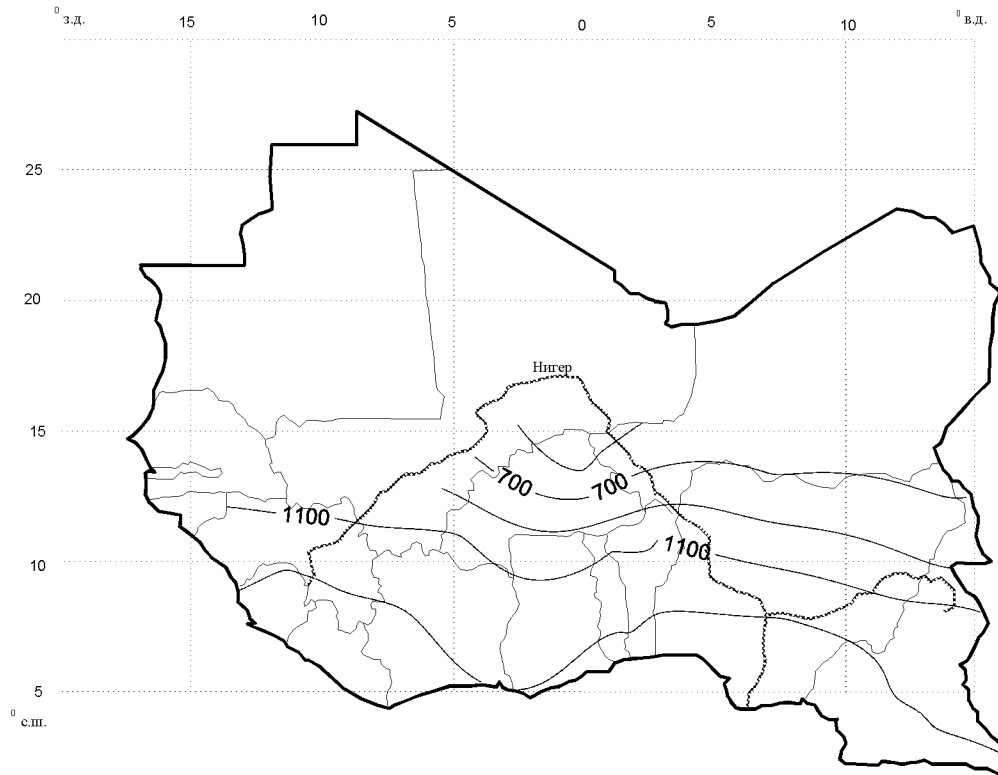
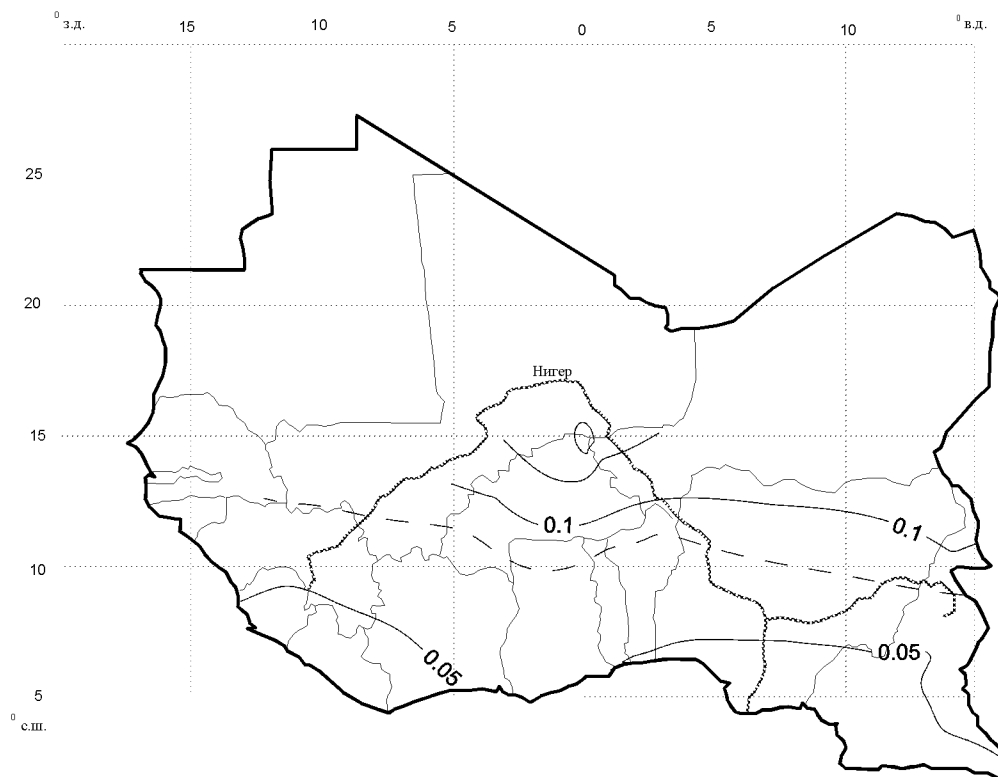


Рисунок 4.7 – Распределение по территории Западной Африки отклонений сценарных нормы стока (a) и коэффициента вариации (б) от фактических значений по модели *MPI-ESM-LR* на период с 2016 по 2035.

a)



б)



в)

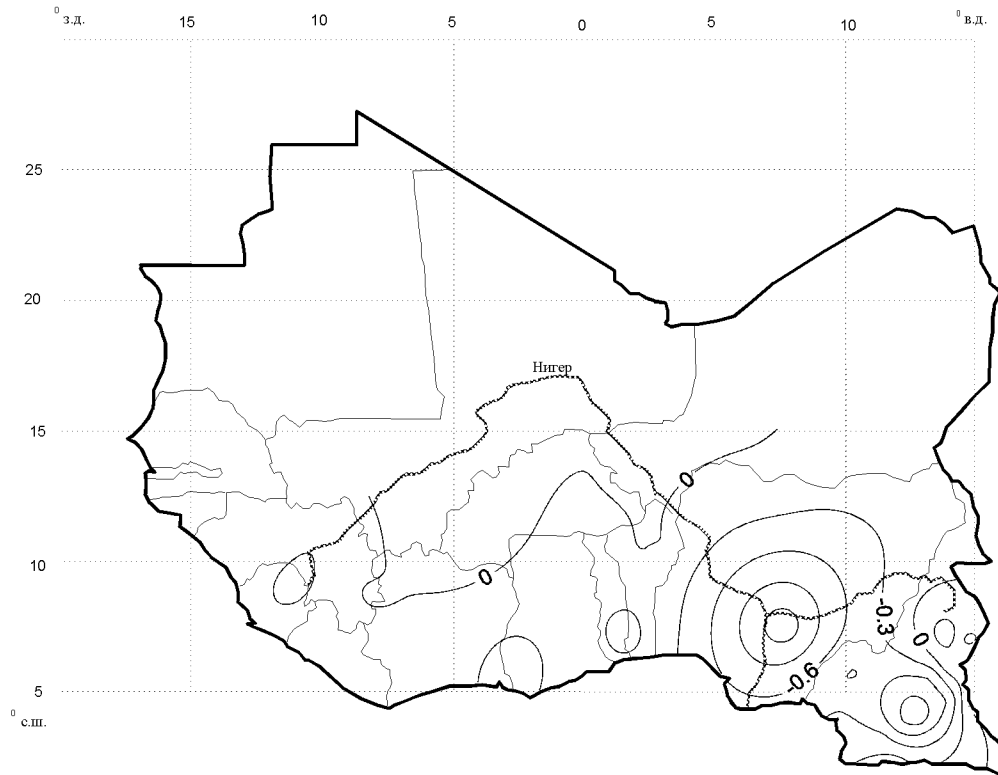
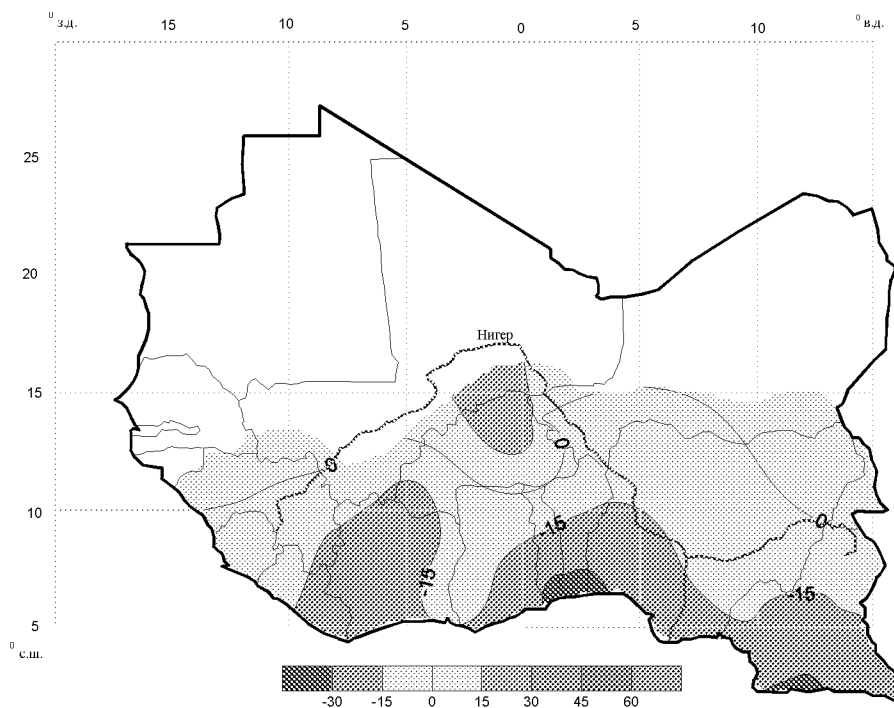


Рисунок 4.8 – Распределение по территории прогнозной нормы испарения (а), коэффициентов вариации (б) и асимметрии (в) по модели *MPI-ESM-LR* на период с 2046 по 2065 гг..

а)



б)

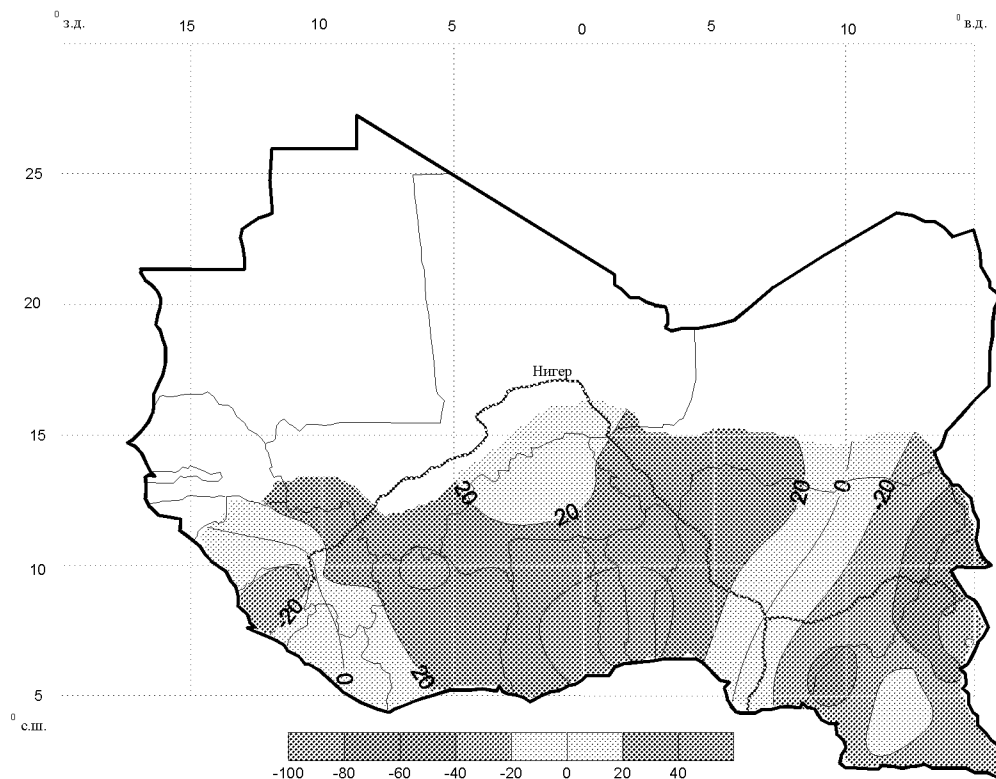


Рисунок 4.9 – Распределение по территории Западной Африки отклонений сценарных нормы испарения (а) и коэффициента вариации (б) от фактических значений по модели *MPI-ESM-LR* на период с 2046 по 2065 гг..

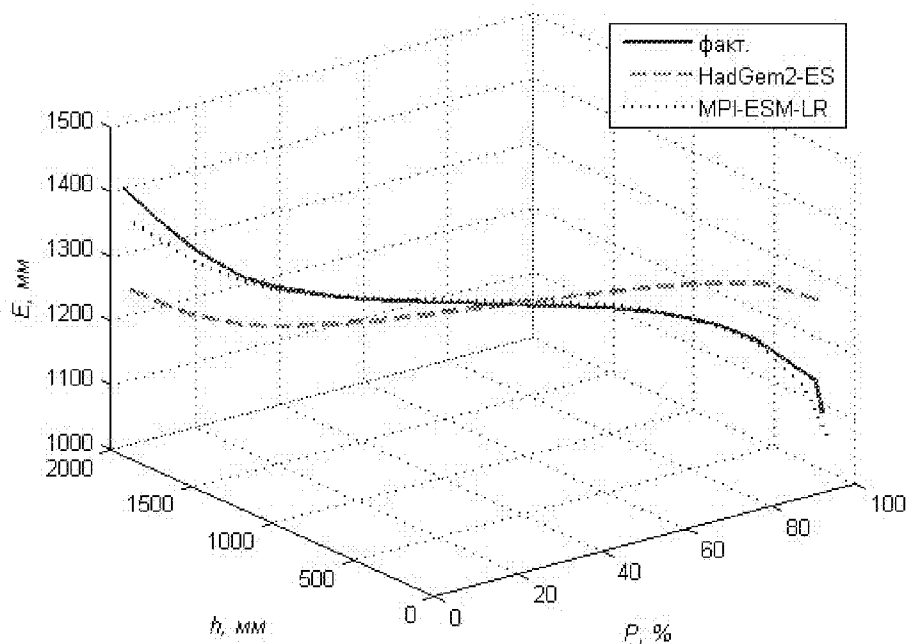
На рисунках 4.7 и 4.9 видно, что статистически значимые отклонения по норме стока распространятся на севере и юге рассматриваемой территории. По коэффициенту вариации аномальные территории будут в бассейне среднего течения р. Нигер.

4.3 Совместный анализ существующих и прогнозных одномерных многообразий

По методике, изложенной в главе 3, построены совместные, фактические и прогнозные, одномерные многообразия, пример которых показан на рисунке 4.8 (остальные кривые в Приложениях Ж и И).

Наблюдается общая тенденция в уменьшении значений стока малых обеспеченностей и увеличение значений в зоне больших обеспеченностей.

a)



b)

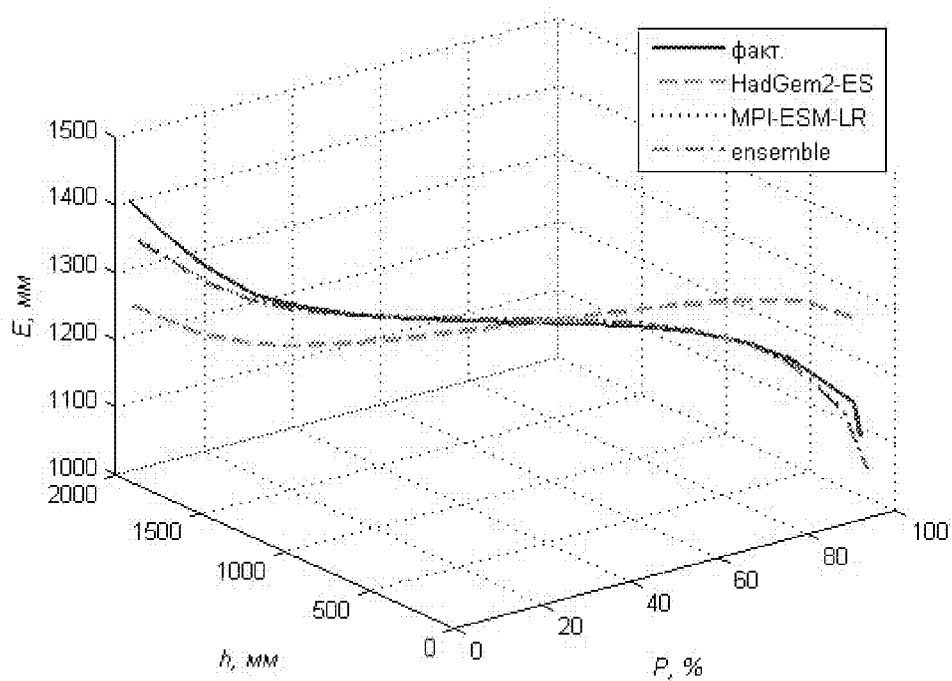


Рисунок 4.8 – Фактические и прогнозные одномерные многообразия для р. Niger – ст. Faranah: *a* – период с 2016 по 2035 гг.; *b* – период с 2046 по 2065 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненного исследования были получены следующие результаты:

– Обработкой фактических рядов наблюдений за речным стоком, осадками и приземной температурой воздуха удалось создать синхронные ряды этих гидрометеорологических характеристик и, используя метод Тюрка, сгенерировать ряды испарения для дальнейшего статистического анализа и обработки совместно с рядами многолетнего речного стока.

– Синхронные совместные ряды стока и испарения подверглись проверке на стационарность (однородность) по статистическим критериям Фишера и Стьюдента, а также – на наличие многоводных и маловодных периодов путем построения разностно-интегральных кривых. В результате удалось сформировать базу данных Западной Африки, необходимых для получения двумерных вероятностных распределений стока в которую вошло 46 рядов статистически приемлемых (уровень значимости 5 %) для получения условных распределений речного стока с устойчивой нормой и коэффициентом вариации.

– Построены двумерные распределения плотности вероятности $p(Q, E)$ с использованием которых получены безусловные и условные распределения $p(Q)$ с повышенной устойчивостью статистических моментов за счет частичной разгрузки от мультипликативных шумов, порождаемых вариациями потерь стока на испарение.

– Установлено, что с уменьшением обеспеченности расходов воды расхождение хвостов условных и безусловных кривых вероятностных распределений увеличиваются.

– Найдена возможность визуализации совместных кривых обеспеченности речного стока и испарения путем построения совместных одномерных многообразий в координатах трехмерном пространстве обеспеченность–

сток–испарение, которая реализована на примере речных бассейнов Западной Африки для условий существующего и наиболее вероятного сценарного климата в XXI в.

– Получены географические карты 0,1 %, 1 % и 10 %-ой обеспеченности стока и испарения для современного и прогнозируемого климата с помощью которых выявлены регионы наиболее значимых аномалий, в которых возможны негативные последствия для водозависимых отраслей экономики Западной Африки.

В списке литературы с 43 по 56 источник приведены работы автора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Физическая география материков и океанов [Электронный ресурс] // Экологический центр «Экосистема», А.С. Боголюбов, 2001–2015. – Режим доступа: <http://www.ecosystema.ru/08nature/world/geoworld/08-3.htm> (дата обращения 02.02.2015).

2 The Global Runoff Data Centre [Электронный ресурс] // Federal Institute of Hydrology (BfG), 2014. – Режим доступа: http://www.bafg.de/GRDC/EN/01_GRDC/13_dtbse/database_node.html (дата обращения 28.03.2014).

3 Earth System Research Laboratory / Physical Sciences Divisions [Электронный ресурс] // U.S. Department of Commerce / National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2013. – Режим доступа: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data.html> (дата обращения 07.11.2013).

4 Гайдукова, Е. В. Критический анализ методов расчета суммарного испарения для речных бассейнов Африки / Е. В. Гайдукова, Х. Диавара, Э. Бонгу // Теория и практика современной науки: XVI Международная научно-практическая конференция / Науч.-инф. издат. Центр «Институт стратегических исследований». – Москва: Изд-во «Институт стратегических исследований», 2014. – С. 531–537.

5 Будыко, М. И. Испарение в естественных условиях [Текст] / М. И. Будыко. – Л.: Гидрометеиздат, 1948. – 136 с.

6 Соколовский, Д. Л. Речной сток [Текст] / Д. Л. Соколовский. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 539 с.

7 Константинов, А. Р. Испарение в природе [Текст] / А. Р. Константинов. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 532 с.

8 Диавара, Х. Долгосрочная оценка вероятностных распределений многолетнего годового испарения с территории Африки при изменении климата [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 25.00.27: защищена 29.10.2015 / Диавара Хамиду. – СПб.: РГГМУ, 2015. – 190 с.

9 André Musy. Hydrologie: Une science de la nature, Tome 1 [Текст] / Musy André, Higy Christophe.– Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2004.– 314 p.

10 Allen Richard G. Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements) [Текст] / Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Crop Smith // FAO, Irrigation and Drainage, Paper N° 56, 2006.– 300 p.

11 Шевнина, Е. В. Параметризация модели формирования стока весеннего половодья на территории Российской Арктики [Текст] / Е. В. Шевнина // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 21.– С. 38-46.

12 Бавина, Л. Г. Испарение и сток с неосушенных болот в годы с различной увлажненностью. [Текст] / Л. Т. Бавина // Труды государственного гидрологического института, 1979 г., выпуск 261.– С. 61–73.

13 Коваленко, В. В. Новые явления и закономерности формирования речного стока. [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб., изд. РГГМУ, 2013. – 172 с.

14 Сикан, А. В. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. [Текст] / А. В. Сикан, Н. Г. Малышева, И. О. Винокуров. – СПб.: изд. РГГМУ, 2014. – 408 с.

15 Pearson, K. Mathematical contributions to the theory of evolution. III. Regression, heredity, and panmixia [Текст] / K. Pearson // Philos. Trans. of the Royal Soc. of London. Ser. A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character. – 1896. – V. 187. – pp. 253–318.

16 Коваленко, В. В. Частично инфинитный механизм турбулизации природных и социальных процессов. [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 164 с.

17 Куасси, Б.Г.А. Фрактальная диагностика годового стока Западной Африки [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 25.00.27: защищена 19.06.2008 / Куасси Би Гессан Арман. – СПб.: РГГМУ, 2008. – 142 с.

18 Коваленко, В. В. Частично инфинитное моделирование и прогнозирование процесса формирования речного стока [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб.: изд. РГГМУ, 2004. – 198 с.

19 Коваленко, В. В. Частично инфинитная гидрология [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб., изд. РГГМУ, 2007. – 230 с.

20 Коваленко, В. В. Теория катастроф и эволюция дифференцируемых многообразий в частично инфинитной гидрологии [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 178 с.

21 Коваленко, В. В. Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб., изд. РГГМУ, 2009. – 100 с.

22 Коваленко, В. В. Обеспечение устойчивости моделирования и прогнозирования речного стока методами частично инфинитной гидрологии [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб.: изд. РГГМУ, 2011. – 107 с.

23 Коваленко, В. В. Метод характеристик в частично инфинитной гидрологии [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб., изд. РГГМУ, 2012. – 136 с.

24 Коваленко, В. В. Модальная неустойчивость при формировании речного стока [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб., изд. РГГМУ, 2014. – 150 с.

25 Коваленко, В. В. Метаморфоз понятий частично инфинитной гидрологии в контексте деструкции онтологии М. Хайдеггером [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб.: изд. РГГМУ, 2015. – 132 с.

26 Коваленко, В. В. Частично инфинитное расширение фазового пространства модели формирования многолетнего речного стока для статистически устойчивого прогнозирования катастроф [Текст] / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, Ф. Л. Соловьев, Д. В. Чистяков // «Естественные и технические науки» № 2, 2009, С. 193–199.

27 Соловьев Ф. Л. Повышение устойчивости вероятностных распределений многолетнего годового стока при прогнозировании долгосрочных его изменений (на примере Европейской территории России): Диссер. на соиск. канд. тех. наук, спец. 25.00.27.– СПб.: РГГМУ, 2009.– 131 с.

28 Коваленко, В. В. Прогнозирование изменений фрактальной размерности многолетнего речного стока [Текст] / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, К. Б. Г. Арман // География и природные ресурсы, 2008, № 4. – С. 136–143.

29 Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB [Текст] / Ю. Лазарев. – СПб.: Питер, 2005. – 512 с.

30 Потемкин, В. Г. MATLAB 6: среда проектирования инженерных приложений [Текст] / В. Г. Потемкин. – М.: Диалог-Мифи, 2003. – 448 с.

31 Митропольский, А. К. Техника статистических вычислений [Текст] / А. К. Митропольский. – М.: Наука, 1971. – 376 с.

32 Коваленко, В. В. О влиянии коэффициента эксцесса на зависимость фрактальной размерности рядов многолетнего стока от климатической нормы приземной температуры воздуха [Текст] / В. В. Коваленко // Ученые записки РГГМУ, № 32, 2013. – С. 17–25.

33 The IPCC Assessment reports [Электронный ресурс] // IPCC, 2009. – Режим доступа: <http://www.ipcc.ch> (дата обращения 09.02.2015).

34 Изменение климата, 2013 г. Резюме для политиков. [Электронный ресурс] / T.F. Stocker, S.K. Allen // Intergovernmental Panel of Climate Change, 2013. – Режим доступа: <http://www.climatechange.kg/>. – (Дата обращения 14.03.2016.).

35 Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. [Электронный ресурс] / В.П. Мелешко, С.М. Семенов // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), 2014. – Режим доступа: <http://climate2008.igce.ru/>. – (Дата обращения 17.03.2016.).

36 Comparison of CMIP5 and CMIP3 climate model precipitation projections. [Электронный ресурс] / J. Wang, H. Yin, F. Chung // Bay-Delta Office, Department of Water Resources, California, 2013. – Режим доступа: <http://www.cwemf.org/>. – (Дата обращения 29.03.2016).

37 Прогнозы изменения климата для России и стран Центральной Азии. [Электронный ресурс] / В.В. Катцов, В.Л. Говоркова, В.П. Мелешко //

North Eurasia Climate Centre, 2008. – Режим доступа: <http://neacc.meteoinfo.ru/>. – (Дата обращения 17.03.2016).

38 Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM 4.0. [Электронный ресурс] / Е.М. Володин // «Известия РАН. Физика атмосферы и океана», 2014. – Режим доступа: <http://www.maik.ru/>. – (Дата обращения 18.03.2016.).

39 Оценка климатических моделей CMIP5 и прогнозируемые изменения температуры на территории Северной Евразии. [Электронный ресурс] / С. Miao, Q. Duan, Y. Huang // IOP Publishing, 2014. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/>. – (Дата обращения 24.03.2016).

40 Лобанов, В. А. Методические указания по выполнению лабораторной работы: «Сценарные оценки будущего климата на основе моделей общей циркуляции атмосферы и океана и данных проекта CMIP5». [Текст] / В. А. Лобанов, А. Л. Кандове, О. А. А. Шукри. – СПб.: изд. РГГМУ, 2014. – 31 с.

41 Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате [Текст] / Под ред. В. В. Коваленко. – СПб. Изд. РГГМУ, 2010. – 51 с.

42 Куасси, К. М. Сценарная оценка долгосрочных изменений вероятностных характеристик многолетнего стока Юго-Западной Африки [Текст]: Дис. ... канд. техн. наук: 25.00.27: защищена 08.10.2015 / Куасси Куаме Модест. – СПб.: РГГМУ, 2014. – 152 с.

43 Коваленко, В. В. Апробация методики долгосрочной оценки многолетних характеристик испарения для речных бассейнов Африки [Текст] / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, Х. Диавара, Э. Бонгу // Технические науки – от теории к практике, (XLI международная научно-практическая конференция), 2014, № 12 (37). – С. 115–123.

44 Судакова, Н. В. Моделирование процесса формирования многолетнего речного стока Африки [Текст] / Н. В. Судакова, Х. Диавара, Э. Бонгу // Вода – источник жизни на Земле: материалы VIII-й всероссийской научной

экологической конференции школьников и студентов, посвященной Всемирным дням Воды и Земли / СПб: ООО «Р-КОПИ», 2015.– 300 с.

45 Бонгу, С. Э. Сценарная оценка климатических характеристик Африки [Текст] / Бонгу С. Э., Диавара Х., Синкпеун Л. // XI международный Большой географический фестиваль (БГФ-2015) студентов и молодых ученых, посвященный 70-летию победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг. и 170-летию Русского Географического Общества.

46 Kovalenko, V. V. Assessment of changes in characteristics of runoff of Africa for various climate scenarios [Текст] / V. V. Kovalenko, E. V. Gaidukova, M. Kuassi, H. Diawara, E. S. Bongu // International Conference on Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management, China. – 2014, pp. 581–584.

47 Kovalenko, V.V. Long-term river runoff in South West Africa: scenario-based assessment of persistent changes[Текст] / V. V. Kovalenko, E. V. Gaidukova, H. Diawara, E. S. Bongu // Discovery Nature, 2015, 9(22), 42-47. (Volume 9, Number 22, Pages 42–47) India.

48 Гайдукова, Е. В. Сценарная оценка безопасности газопроводов при изменении климата [Текст] / Е. В. Гайдукова, Н. В. Судакова, Э. С. Бонгу // Технические науки – от теории к практике, 51, 136-143. 2015

49 Бонгу, С. Э. Сценарная оценка гидрологического режима рек Бенина [Текст] / С. Э. Бонгу // Вестник науки и образования Северо-Запада России 2016, Т. 2, № 1. – <http://vestnik-nauki.ru/>

50 Бонгу, С. Э. Построение двумерных гистограмм для рек Западной Африки [Текст] / С. Э. Бонгу, Н. В. Судакова, А. Джалалванд // Вода – источник жизни на Земле: материалы IX-й всероссийской научной экологической конференции школьников и студентов, посвященной Всемирным дням Воды и Земли, 2016, 86–87 с.

51 Бонгу, С. Э. Сценарная оценка испарения с водосборов Бенина [Текст] / С. Э. Бонгу, Э. Эспития, Е. В. Гайдукова, Н. В. Викторова // Естественные и технические науки, № 6, 2016. – С. 74–77.

52 Коваленко, В. В. О возможности учета испарения при моделировании процесса формирования многолетнего речного стока (на примере Западной Африки) [Текст] / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, Ф. Л. Соловьев, С. Э. Бонгу, А. Джалалванд // Ученые записки РГГМУ, № 42, 2016. –

53 Коваленко, В. В. Учет испарения при моделировании процесса формирования речного стока в Западной Африке [Текст] / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, С. Э. Бонгу, А. Джалалванд // Материалы III Международной научно-практической конференции «Технические науки в мире: от теории к практике», г. Ростов-на-Дону, 2016.

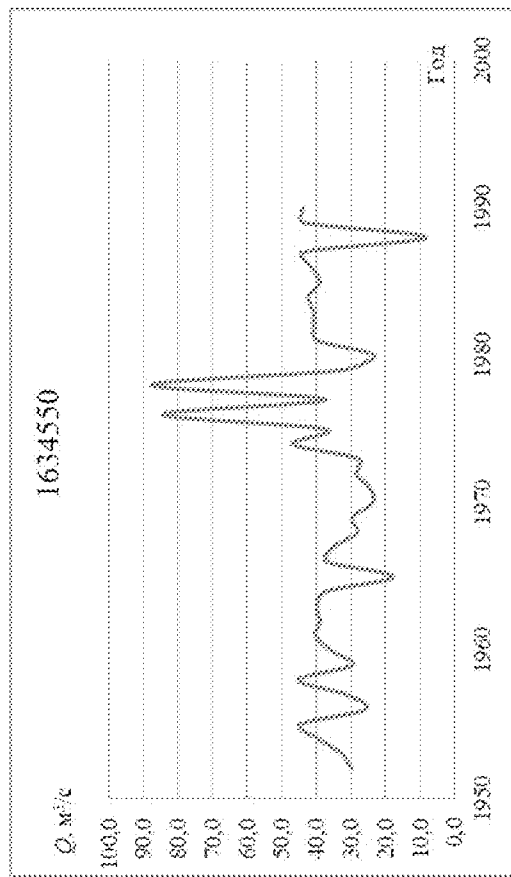
54 Kovalenko, Viktor V. Joint assessment of the probability characteristics of long-term river run-off and evaporation in today's climate conditions and in the expected changes [Текст] / Viktor V. Kovalenko, Ekaterina V. Gaidukova, H. Diawara, Ernestto S. Bongu, A. Dzhahalvand // International Journal of Engineering Research And Management (IJERM), ISSN: 2349-2058, Volume-03, Issue-06, 2016. – P. 83–86.

55 Гайдукова, Е.В. Сценарная оценка нормы изменений суммарных влагозапасов речных бассейнов [Текст] / Е.В. Гайдукова, А. Баймаганбетов, Л. Синкпеун, С.Э. Бонгу // Ученые записки РГГМУ, № 53, 2018. – С. 113–122.

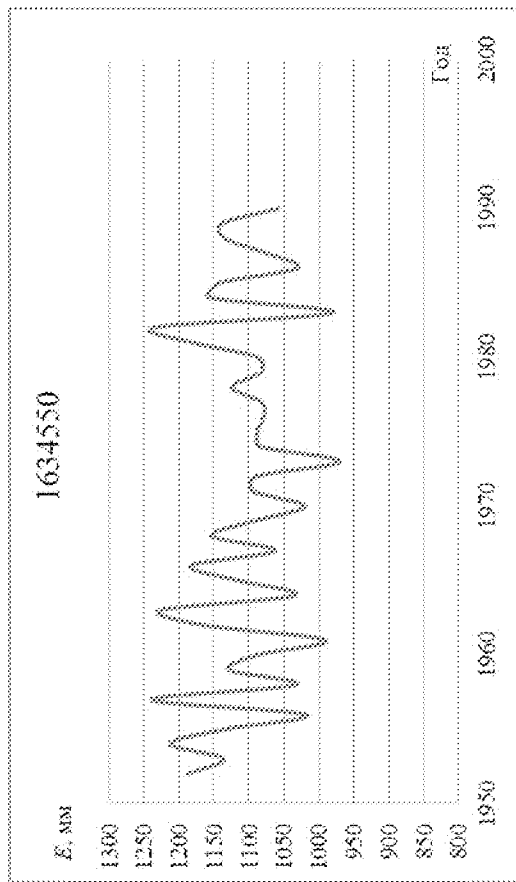
56 Гайдукова, Е.В. Совместная оценка вероятностных характеристик многолетнего речного стока и испарения в условиях современного климата и ожидаемых его изменений [Текст] / Е.В. Гайдукова, А. Джалалванд, Х. Диавара, С.Э. Бонгу // Евразийское Научное Объединение, т. 2, № 7 (41), 2018. – С. 139–142.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Хронологические графики гидрометеорологических элементов

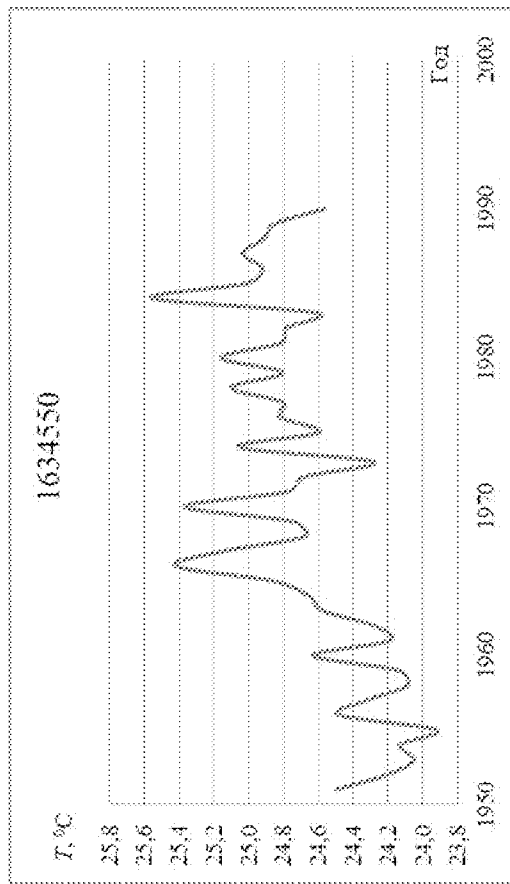
a)



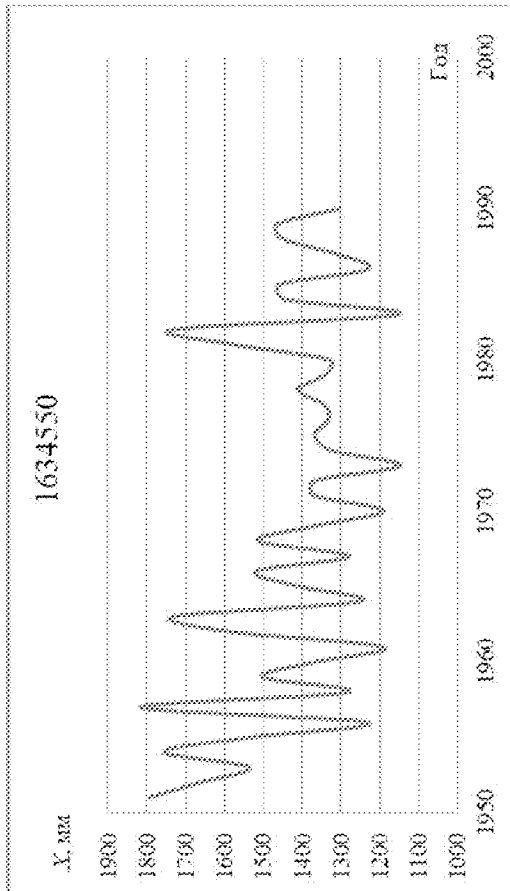
a')



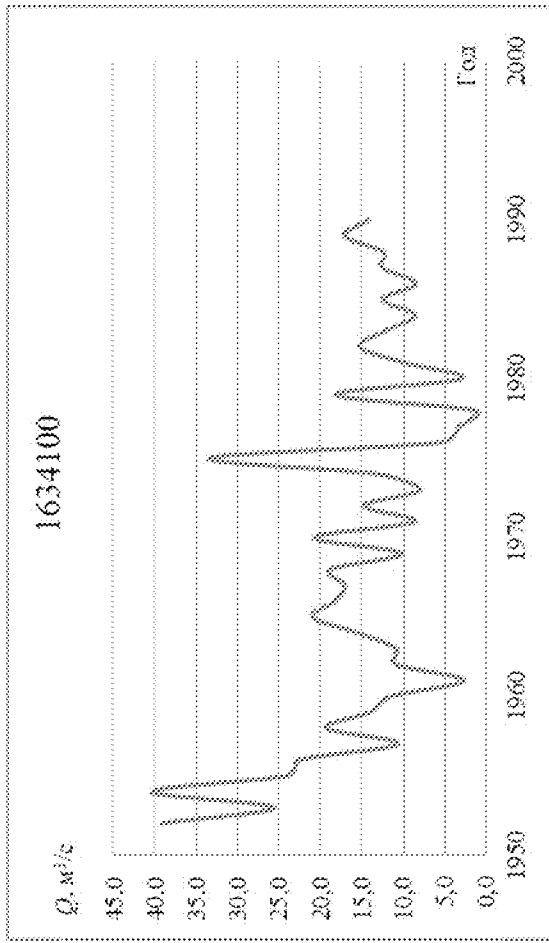
a'')



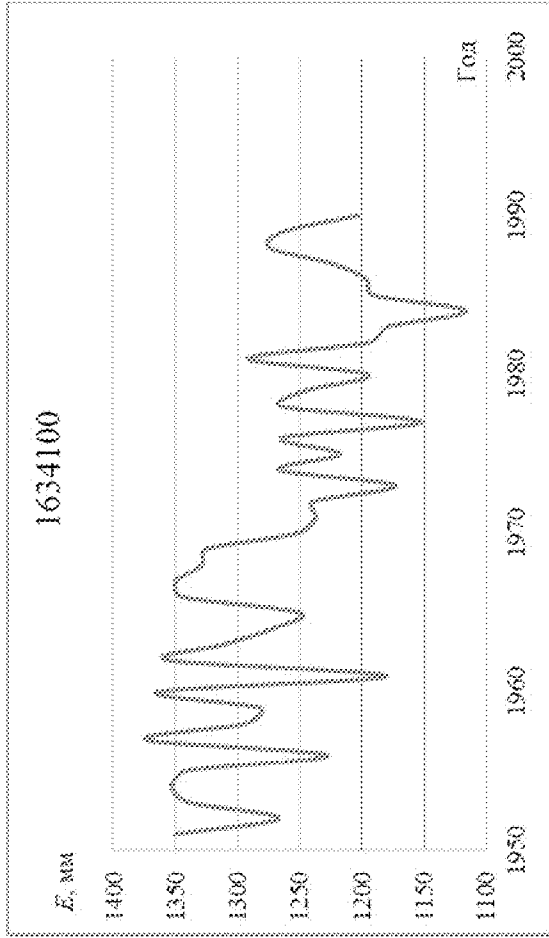
a''')



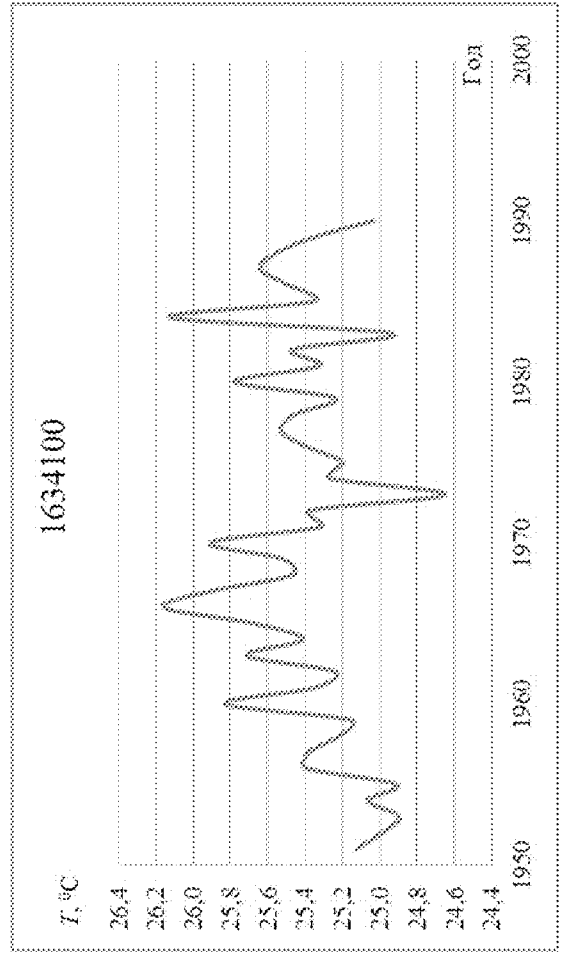
6)



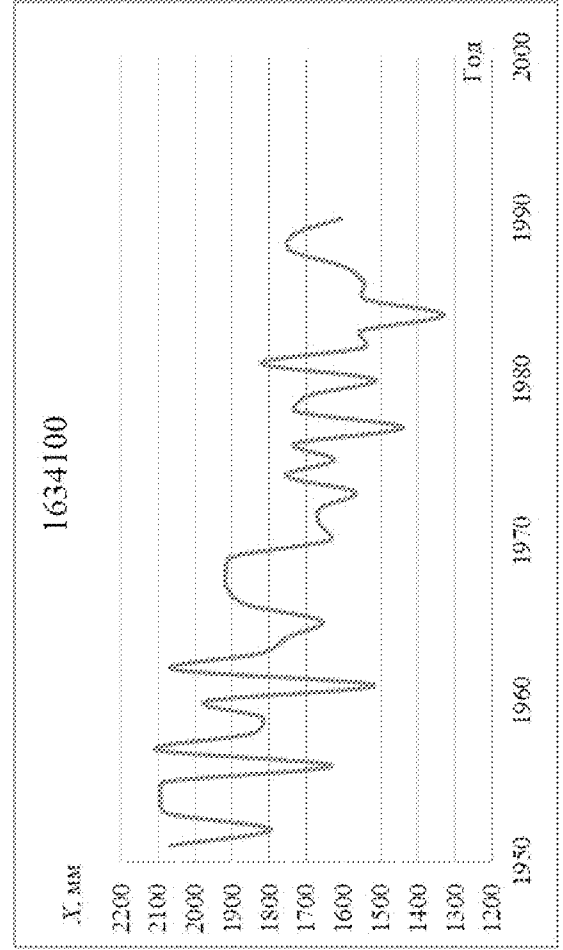
6')



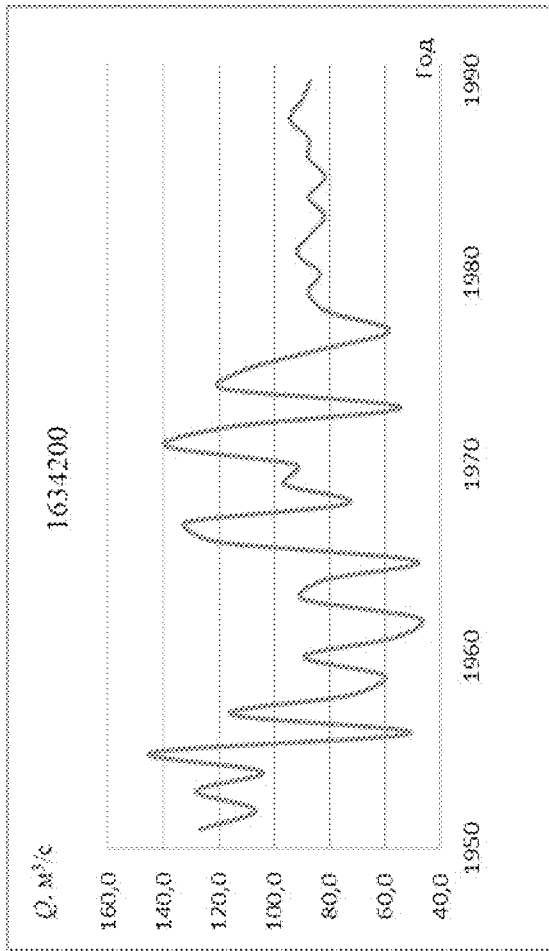
6'')



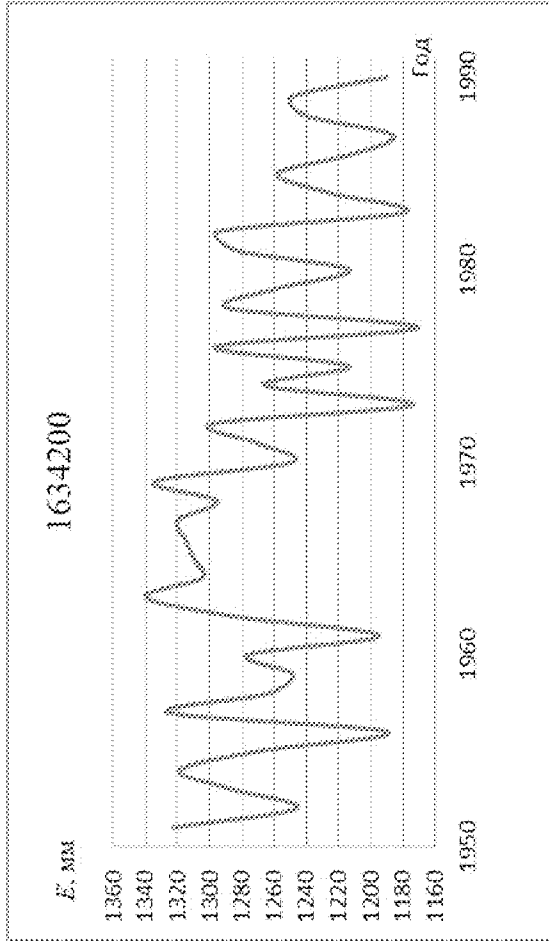
6''')



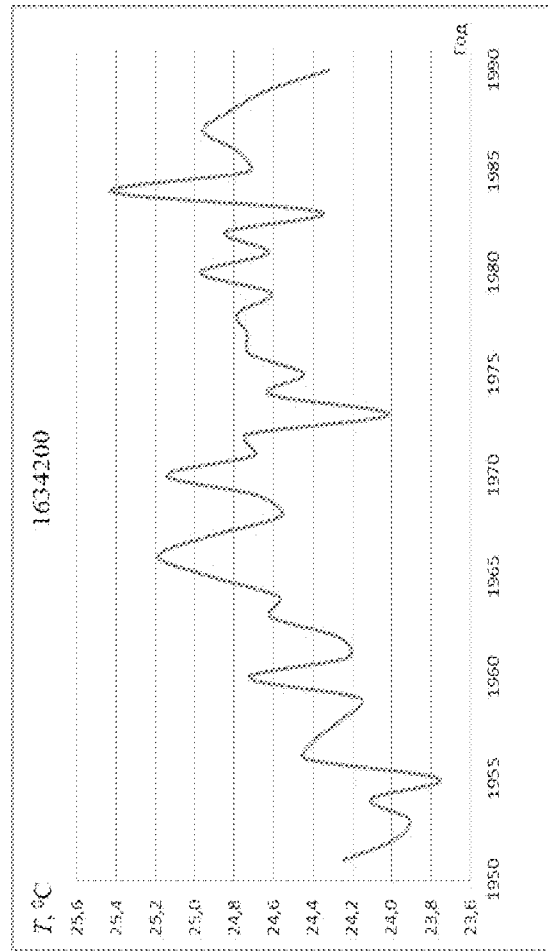
6)



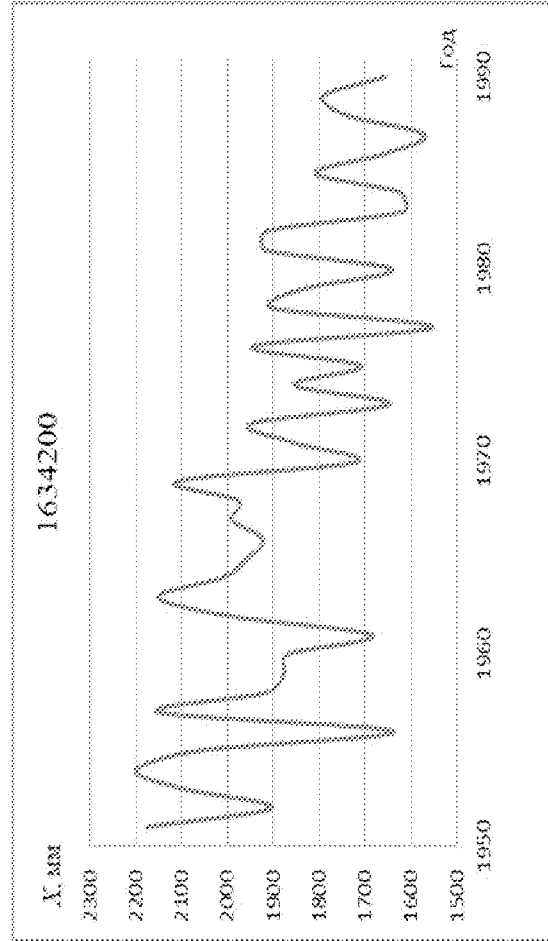
6')



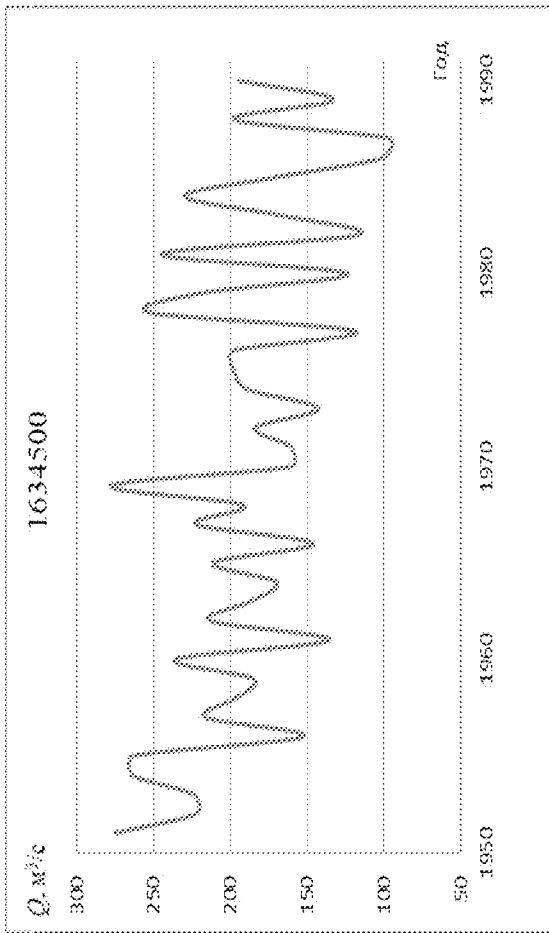
6'')



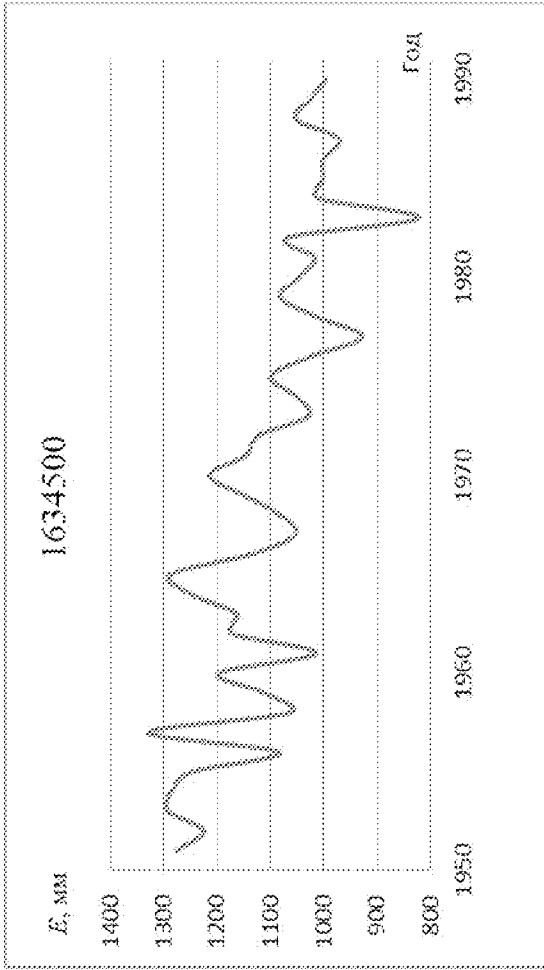
6''')



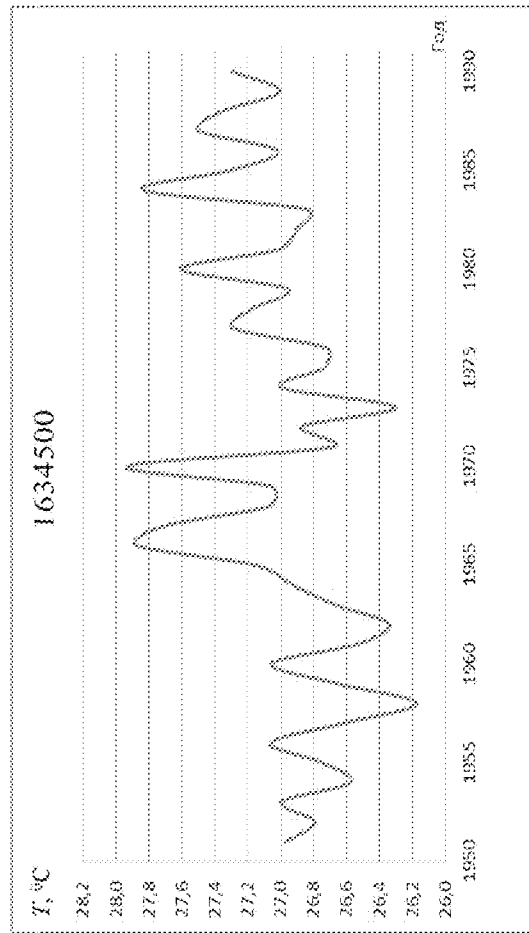
2)



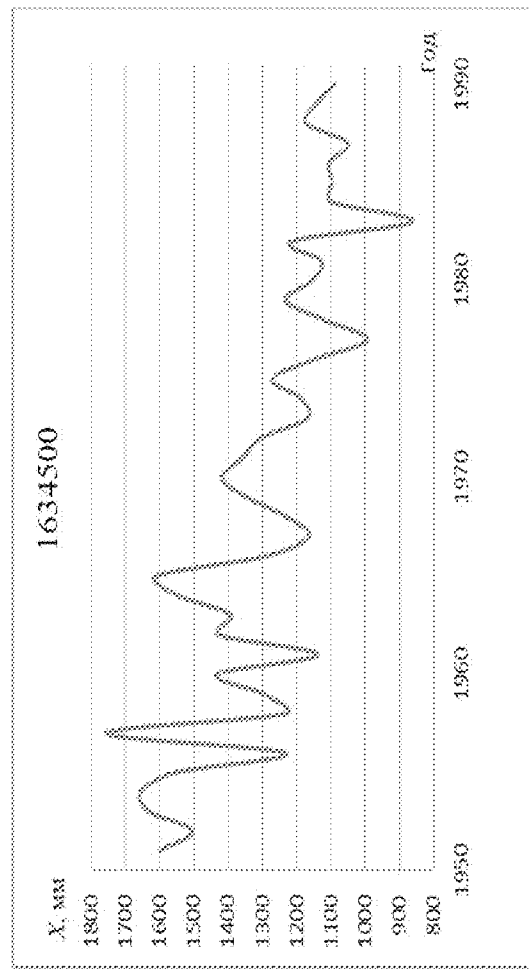
2')



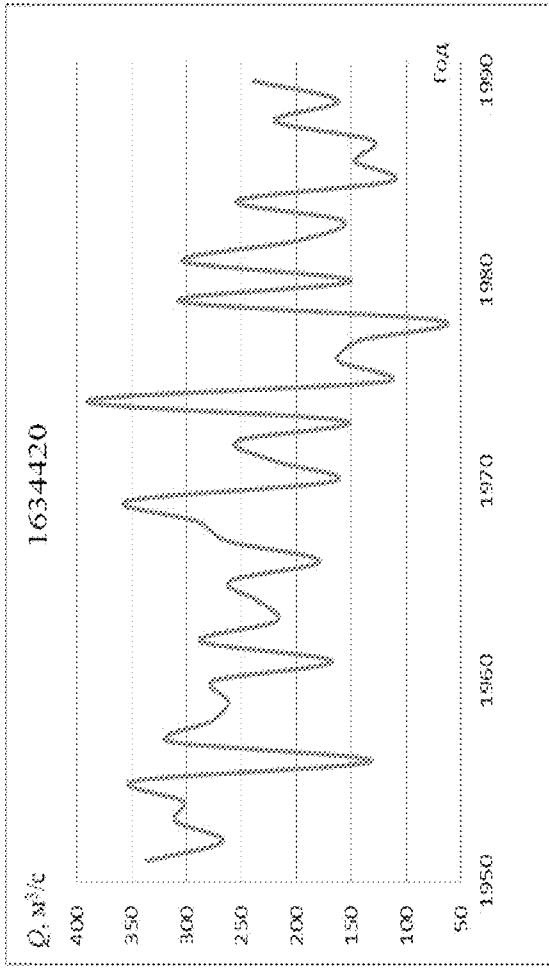
2'')



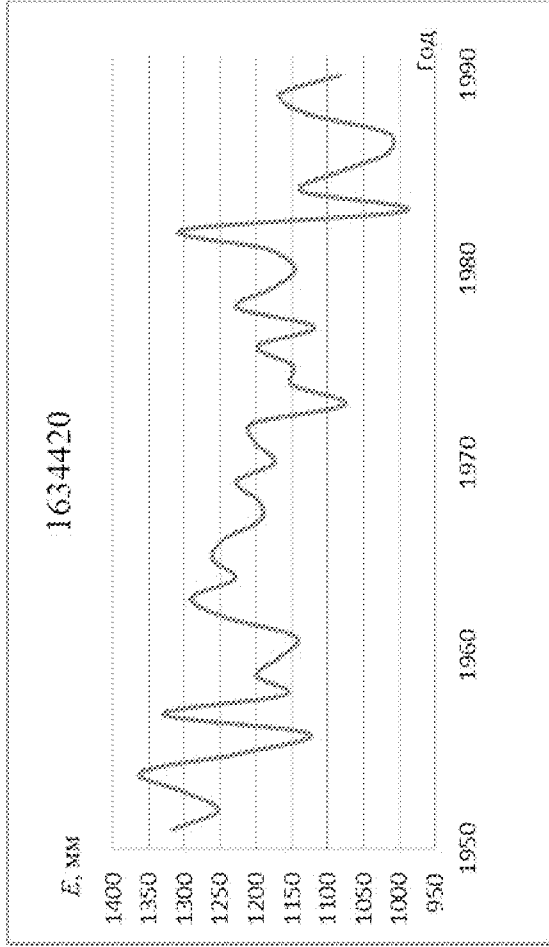
2''')



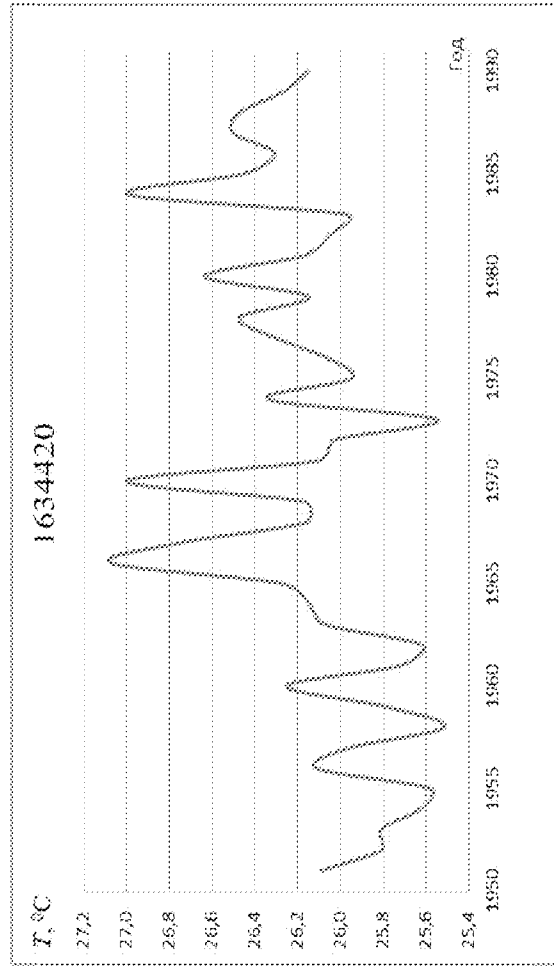
д')



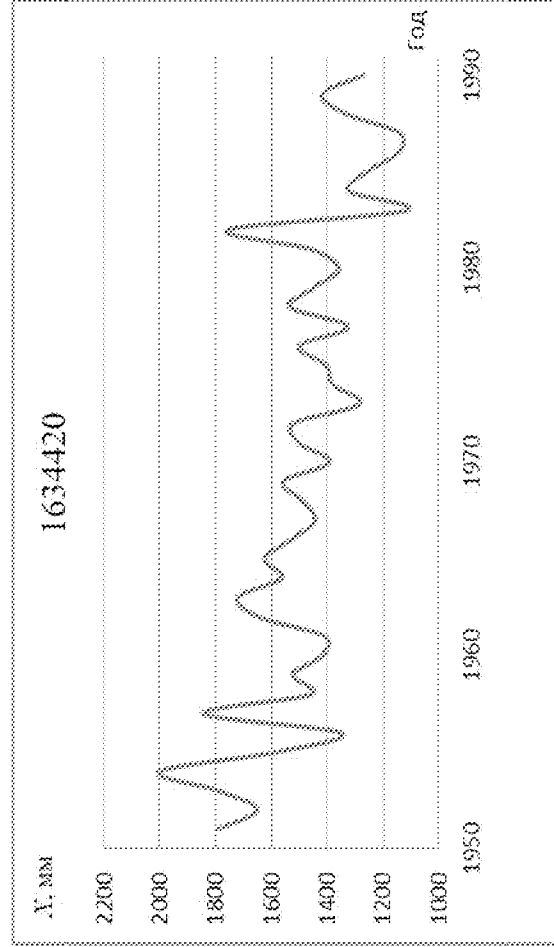
д')



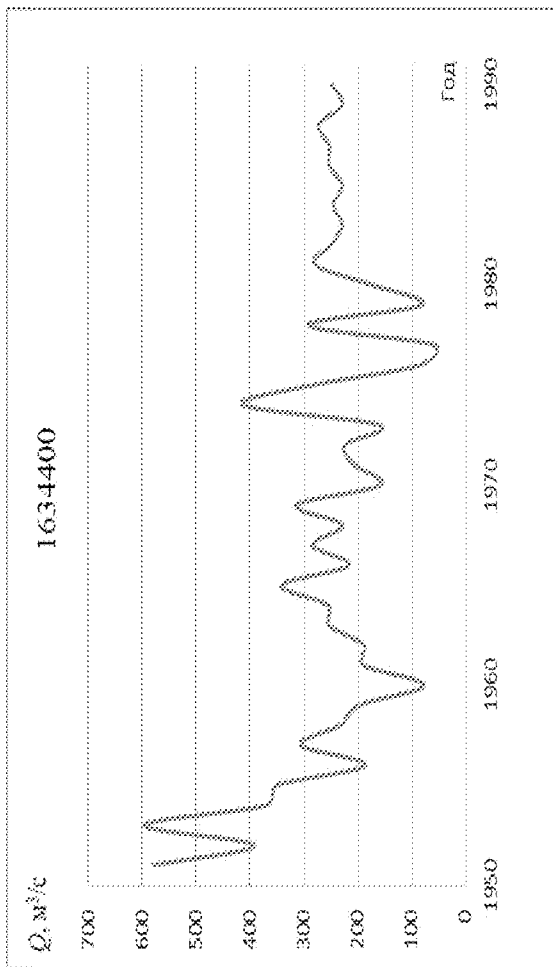
д'')



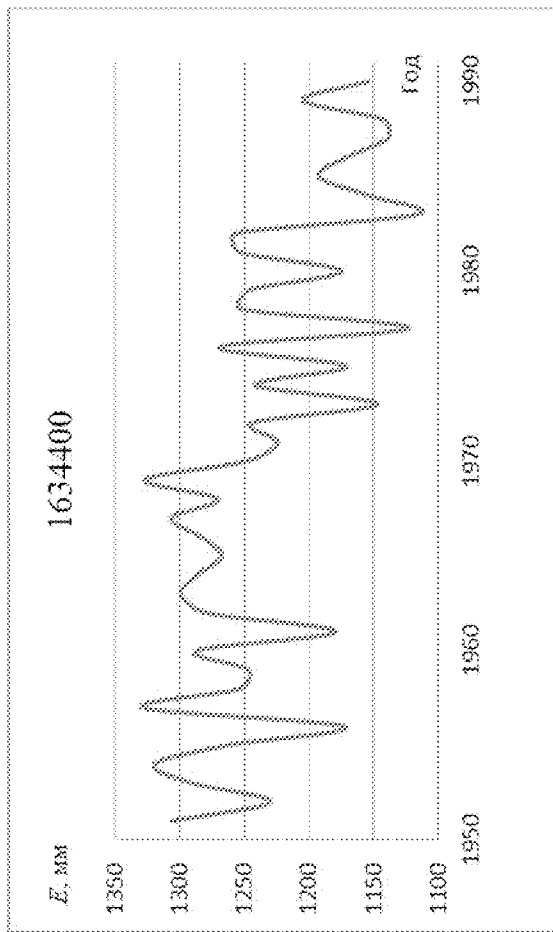
д'')



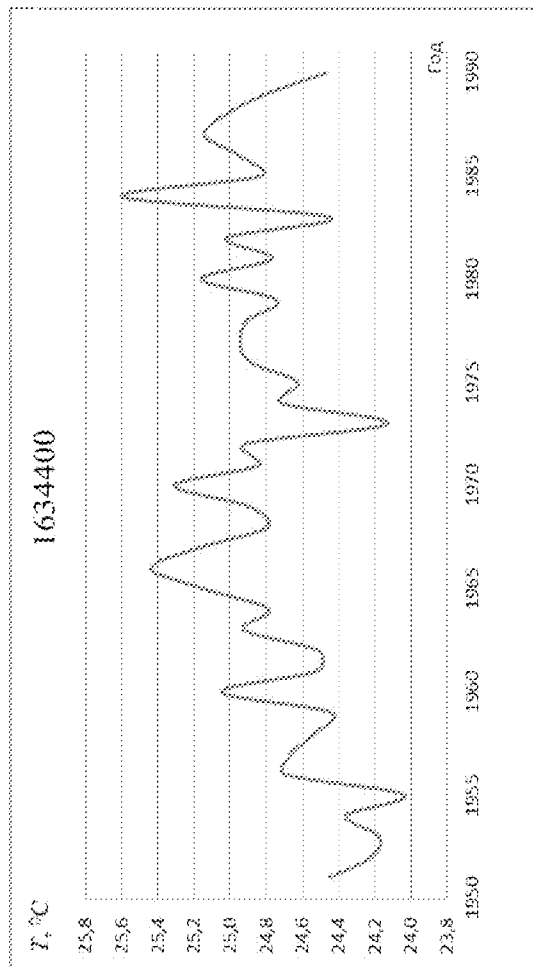
e)



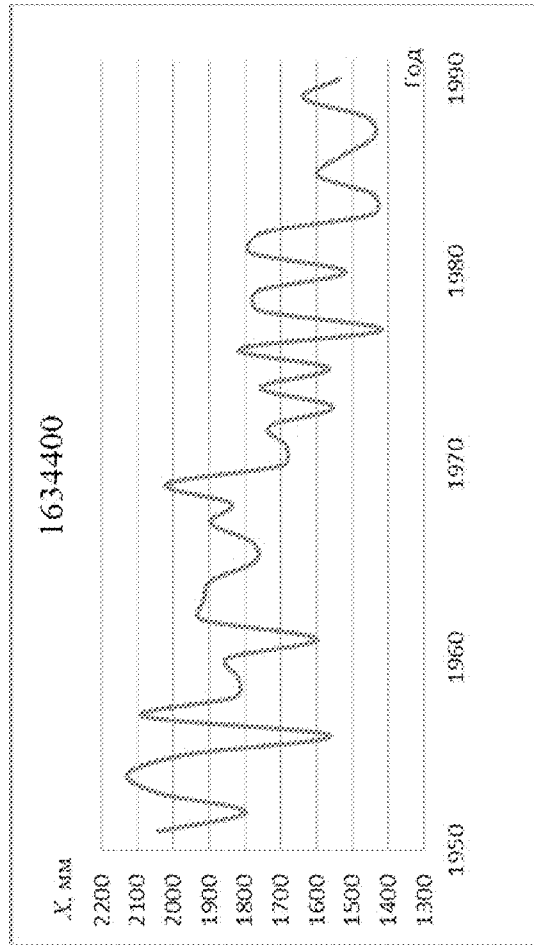
e')



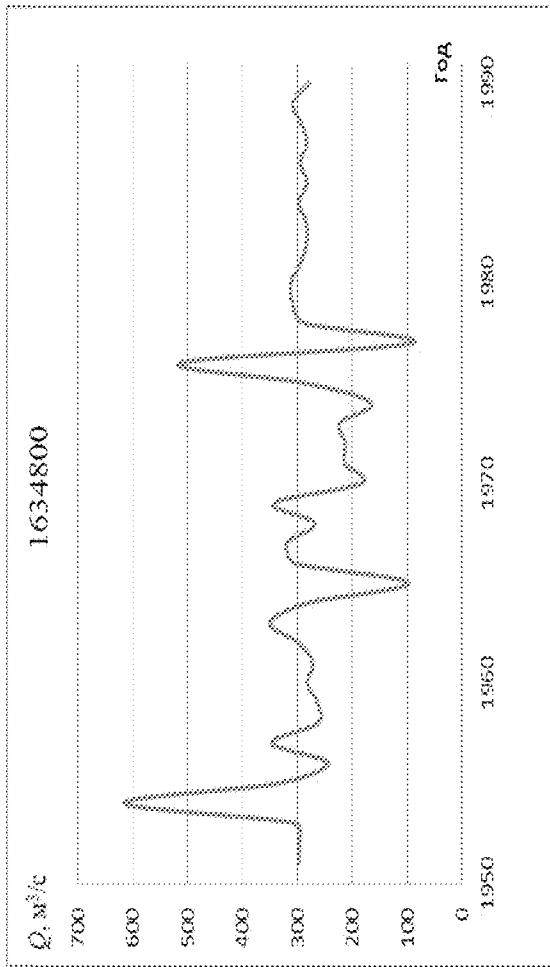
e'')



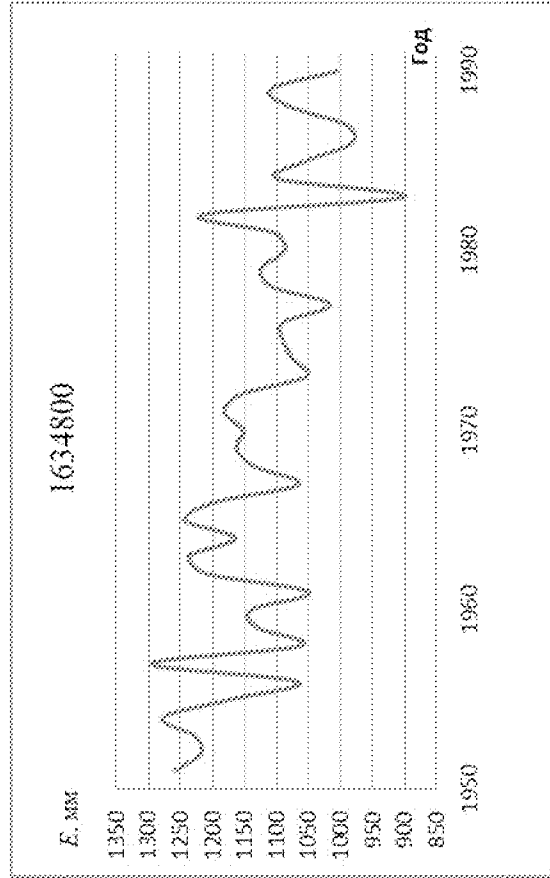
e''')



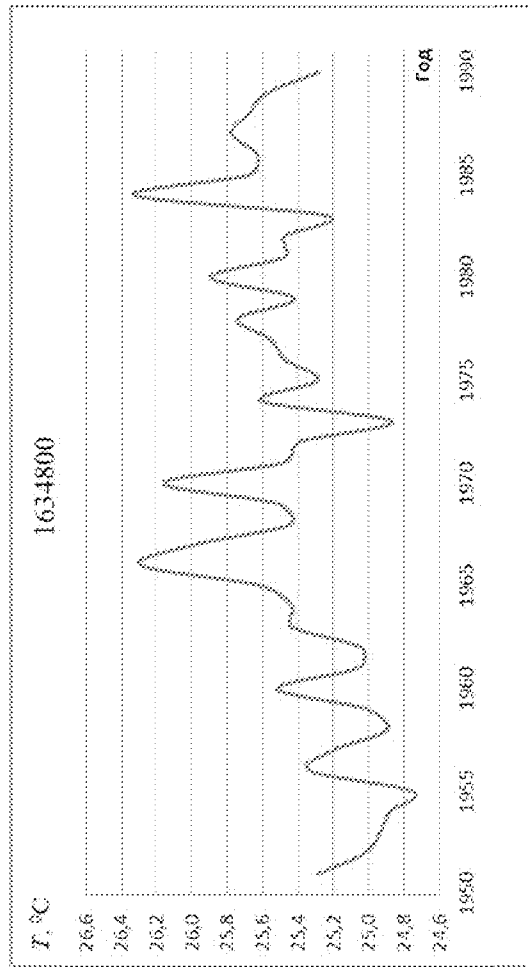
ЖС)



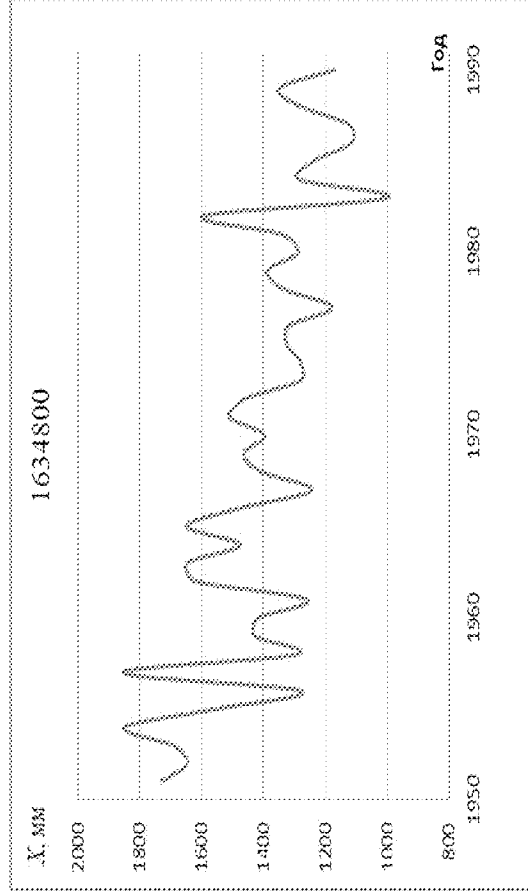
ЖС')



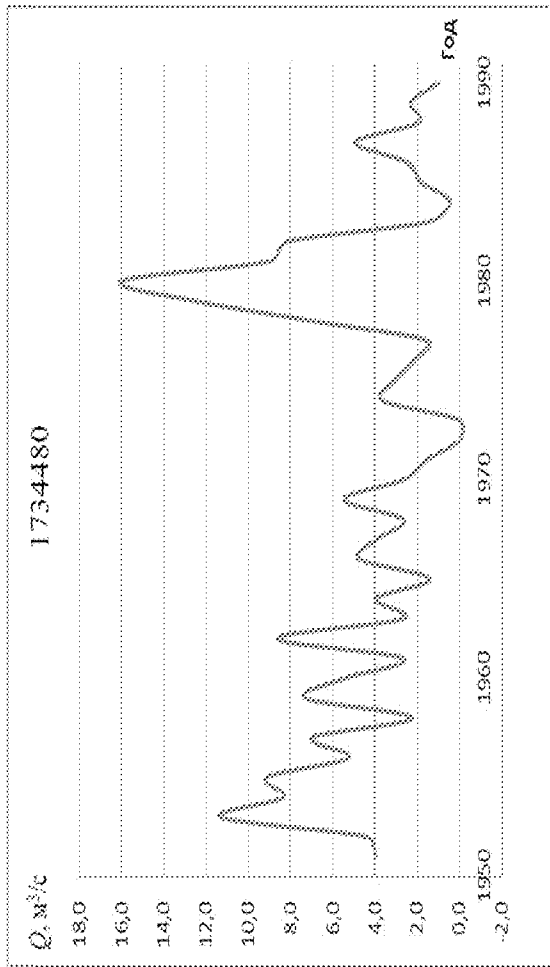
ЖС''



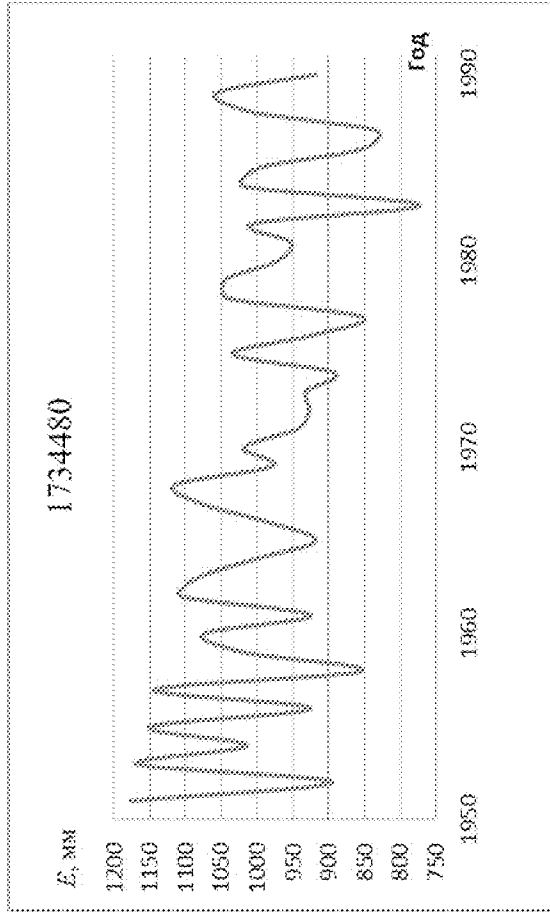
ЖС''')



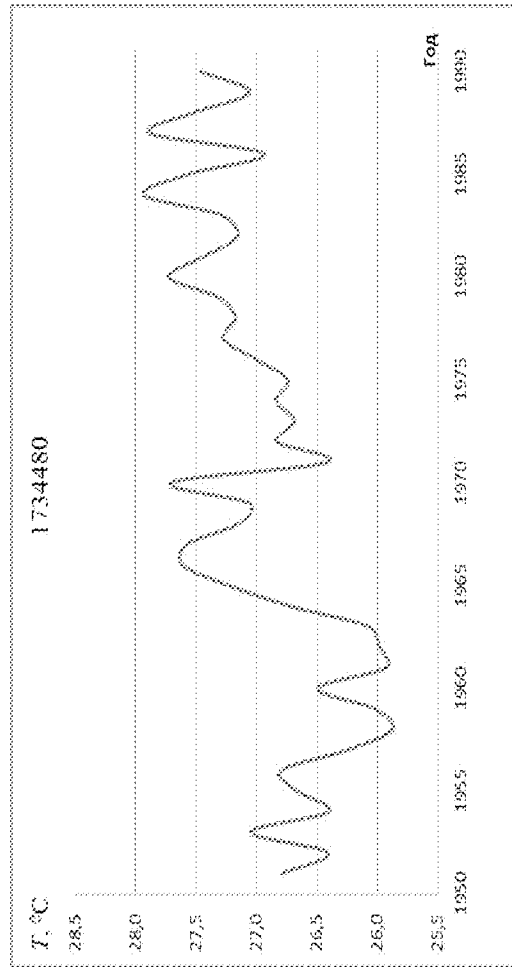
$u)$



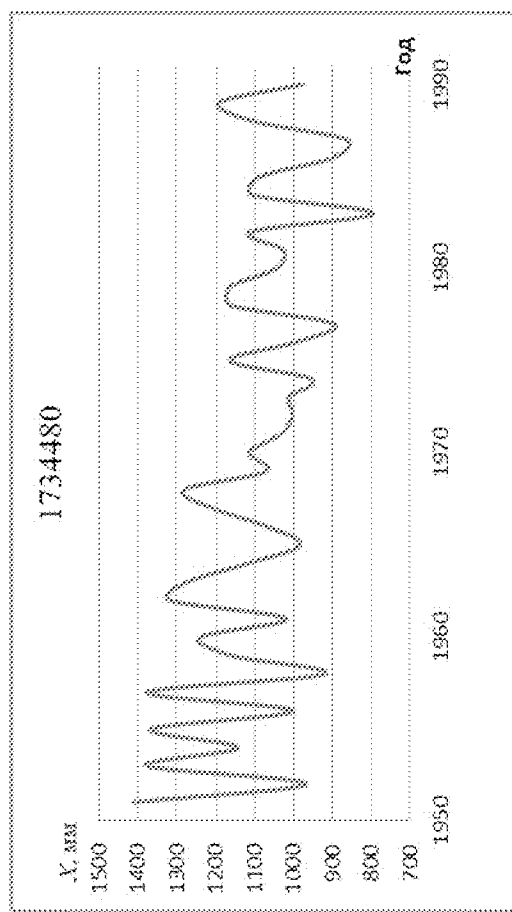
$u)$



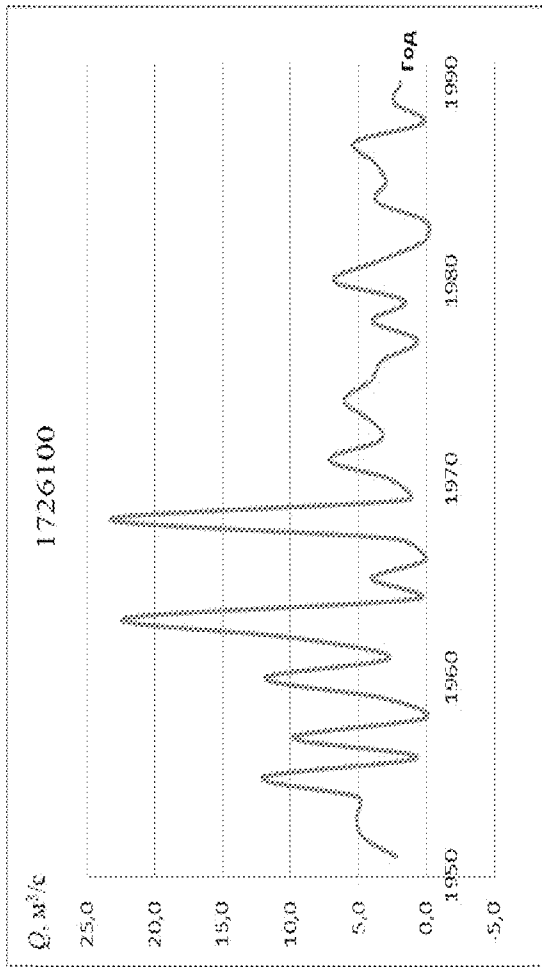
$u'')$



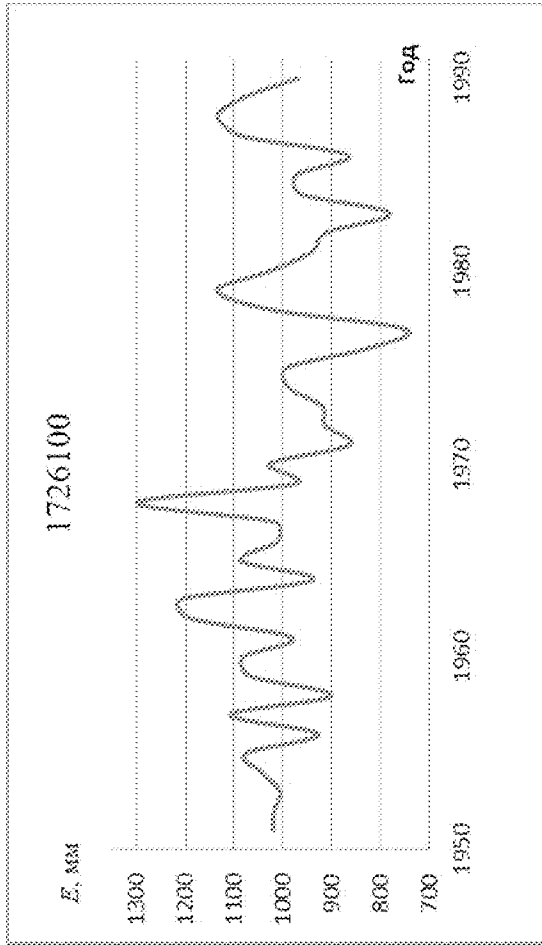
$u'')$



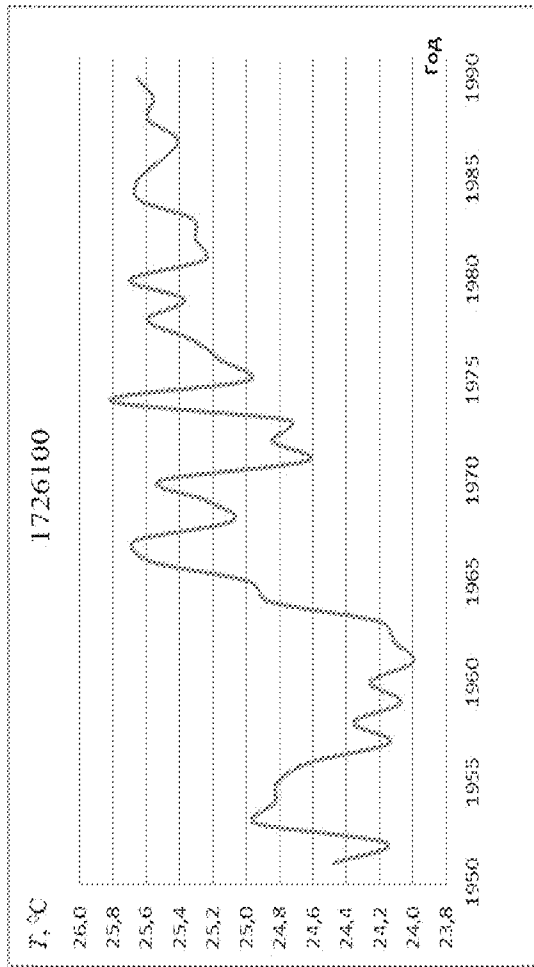
κ'



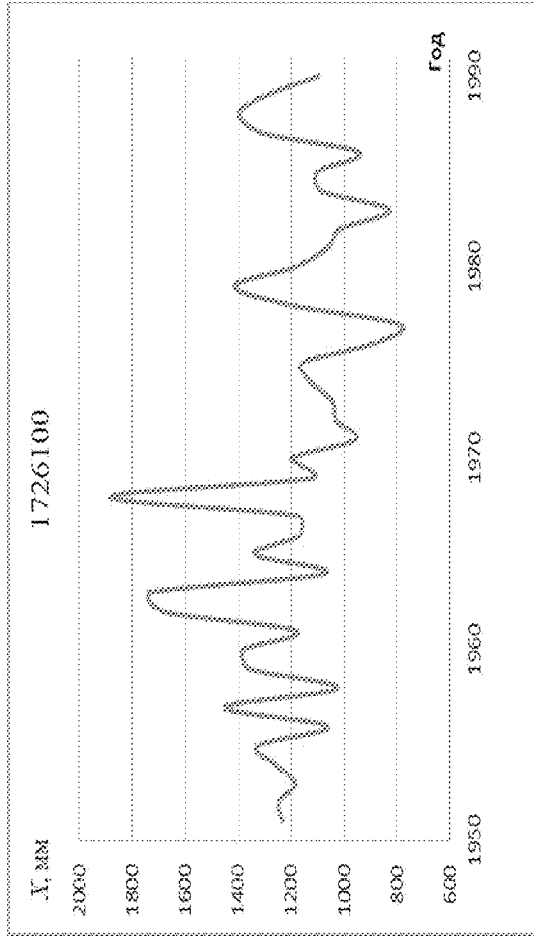
κ



κ''



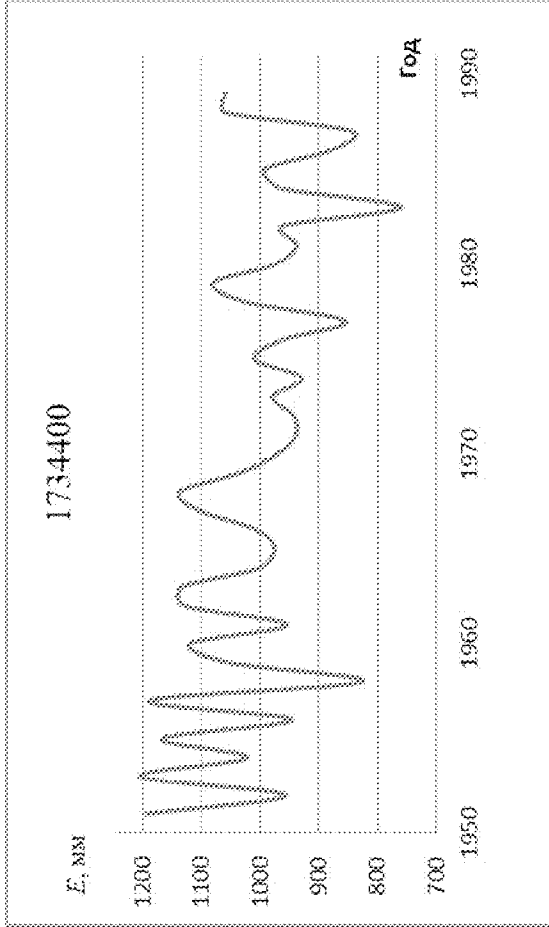
κ'''



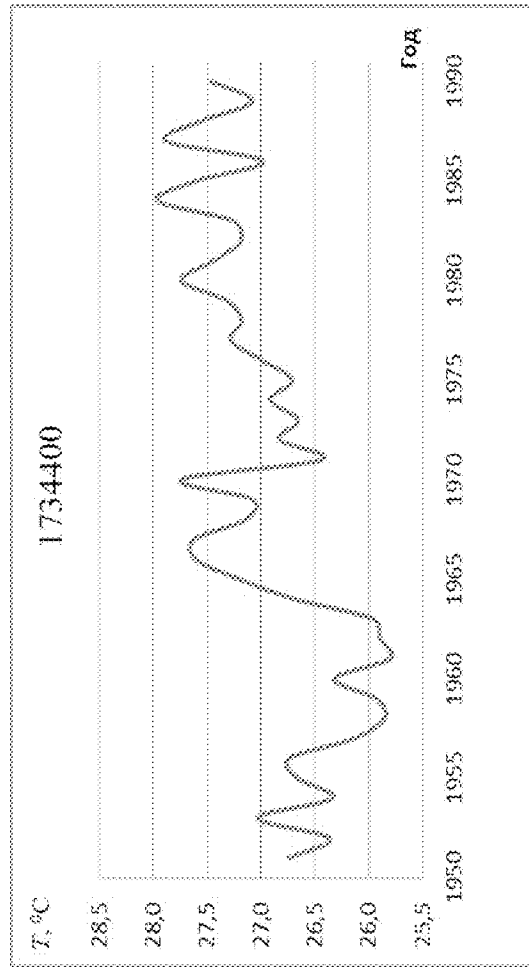
л)



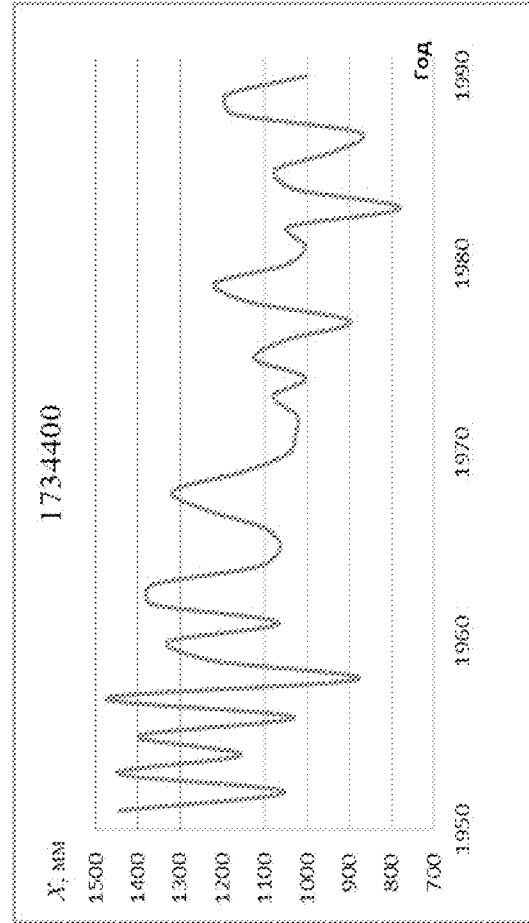
л')



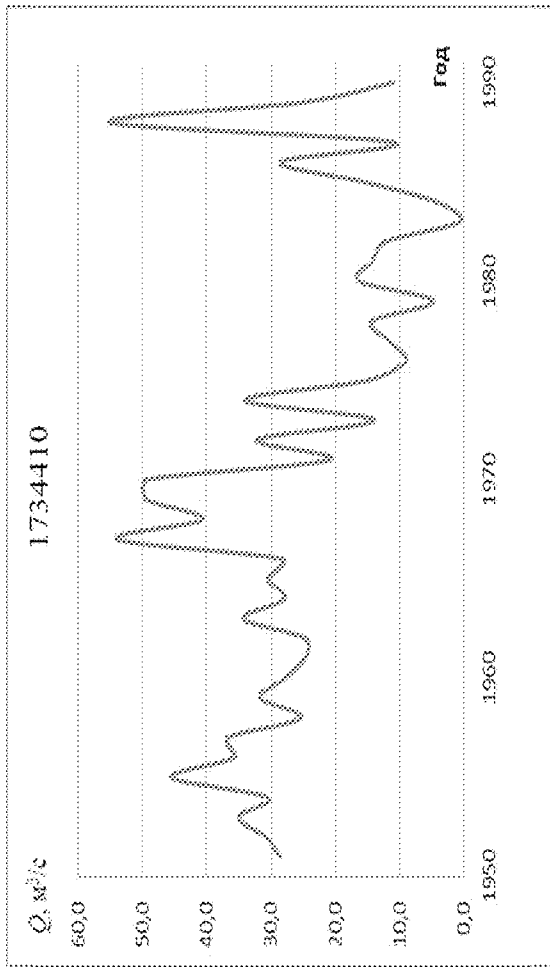
л'')



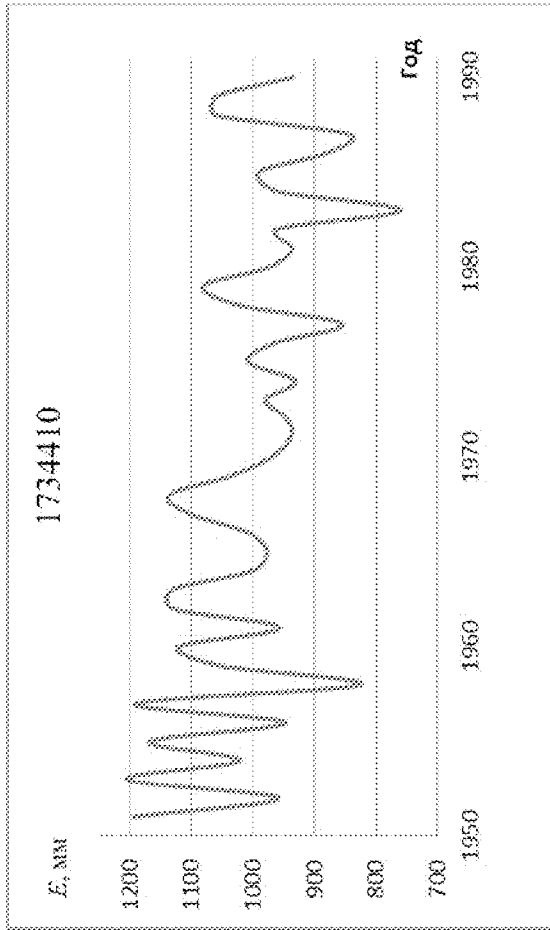
л''')



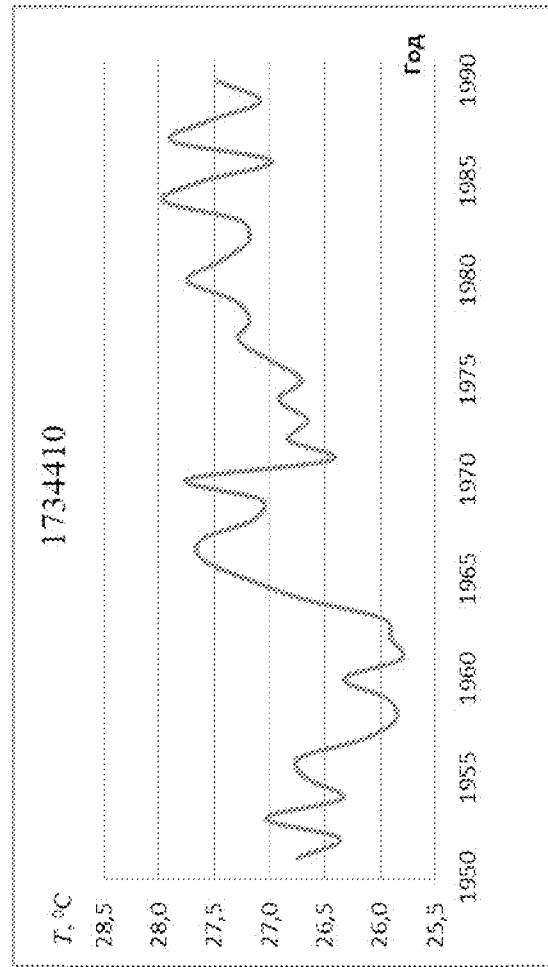
M)



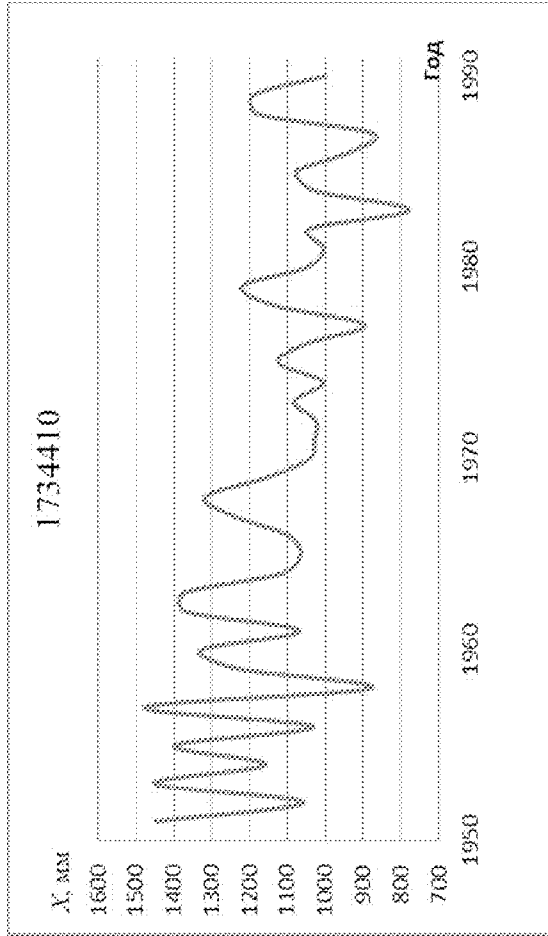
M')



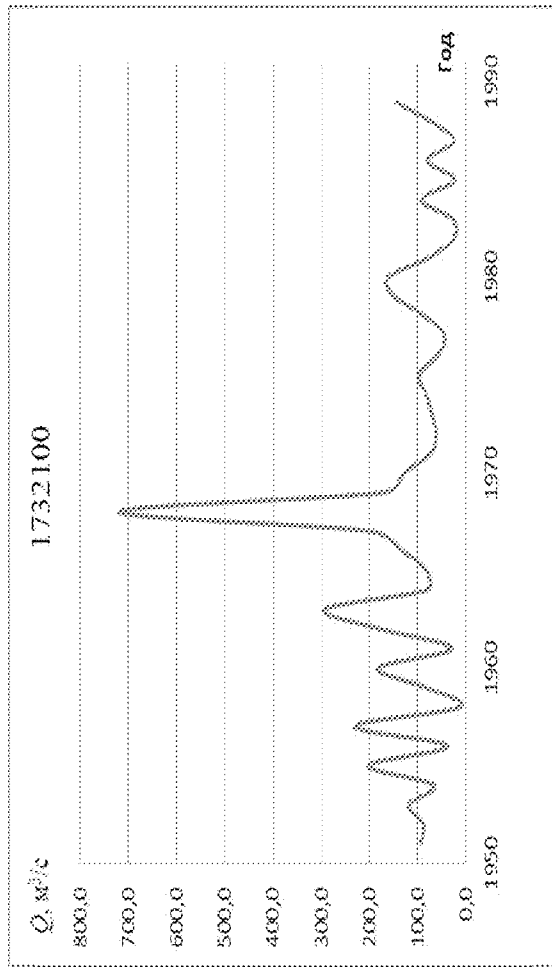
M'')



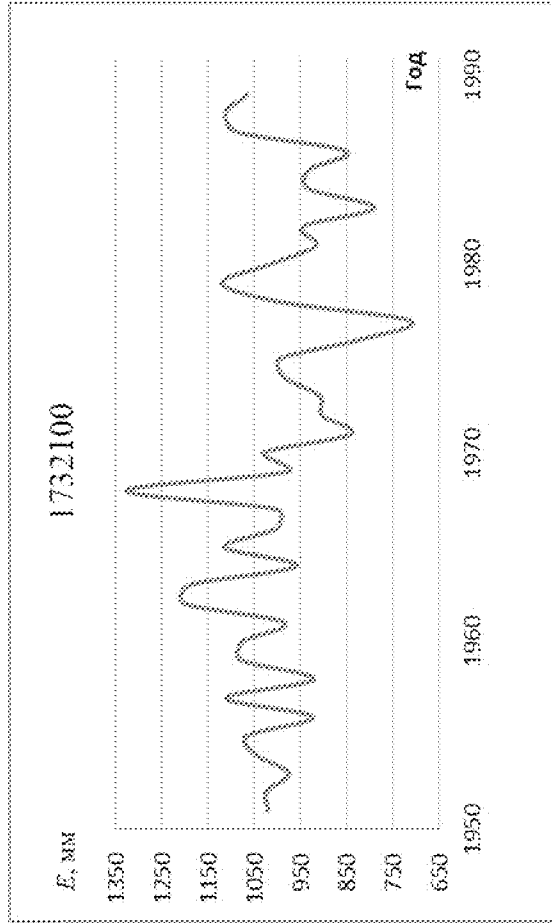
M''')



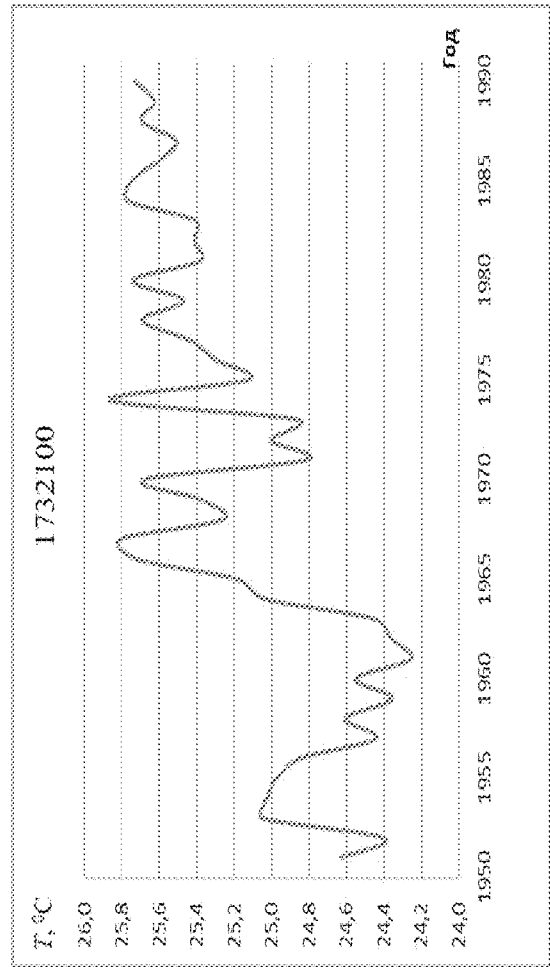
H)



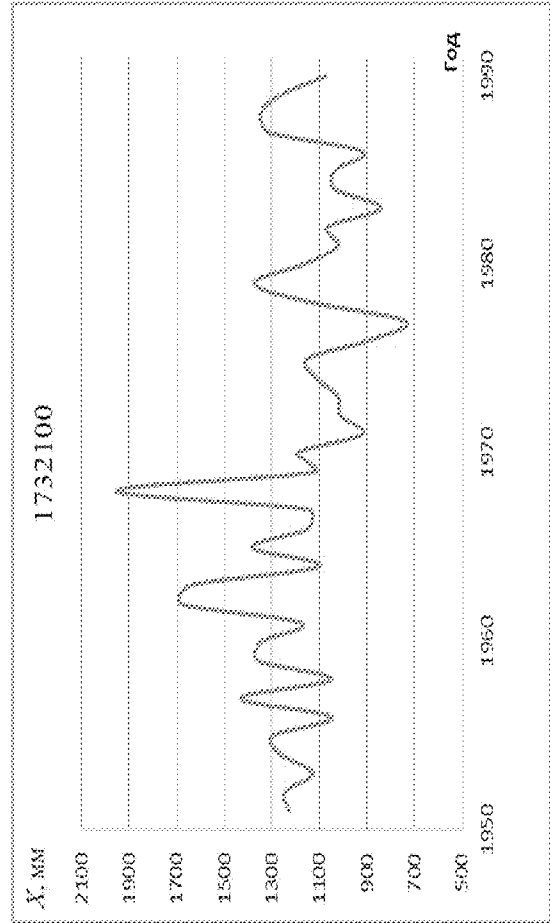
H')



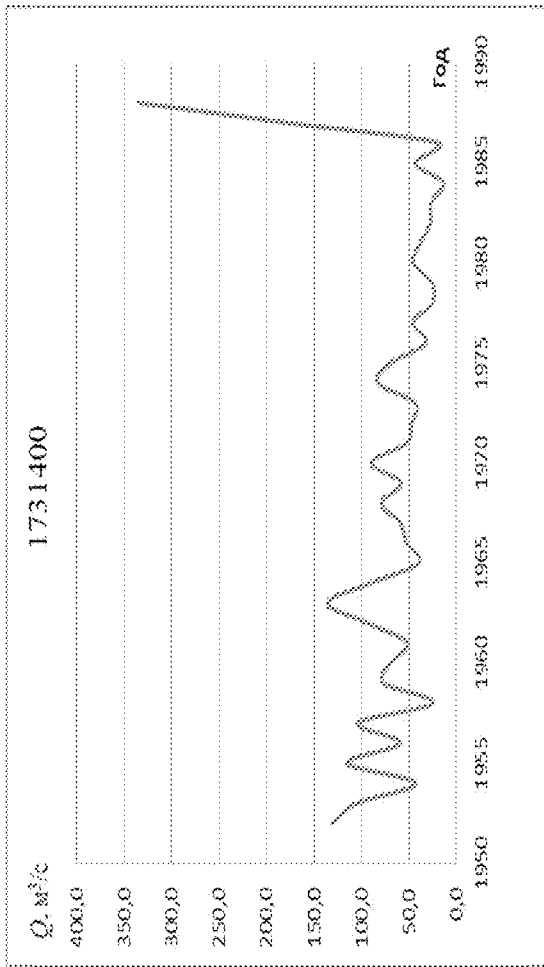
H'')



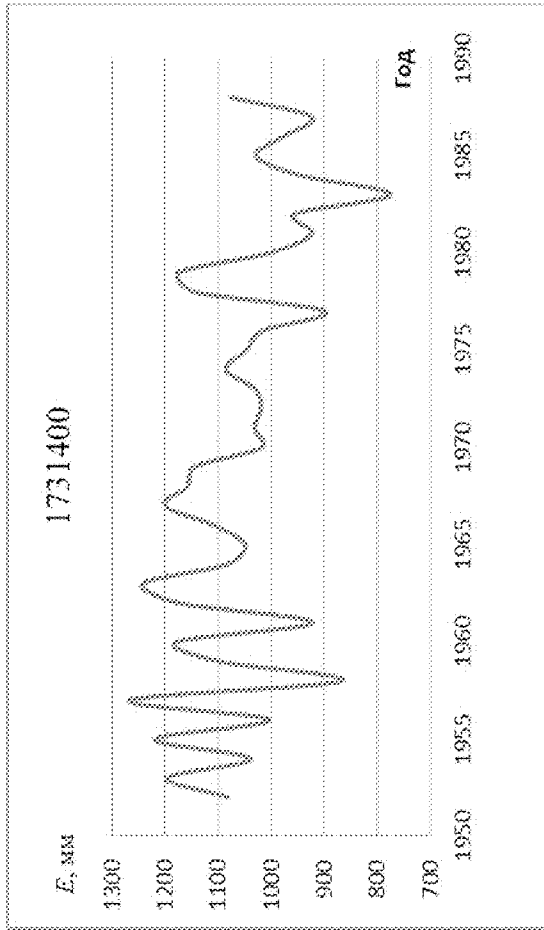
H''')



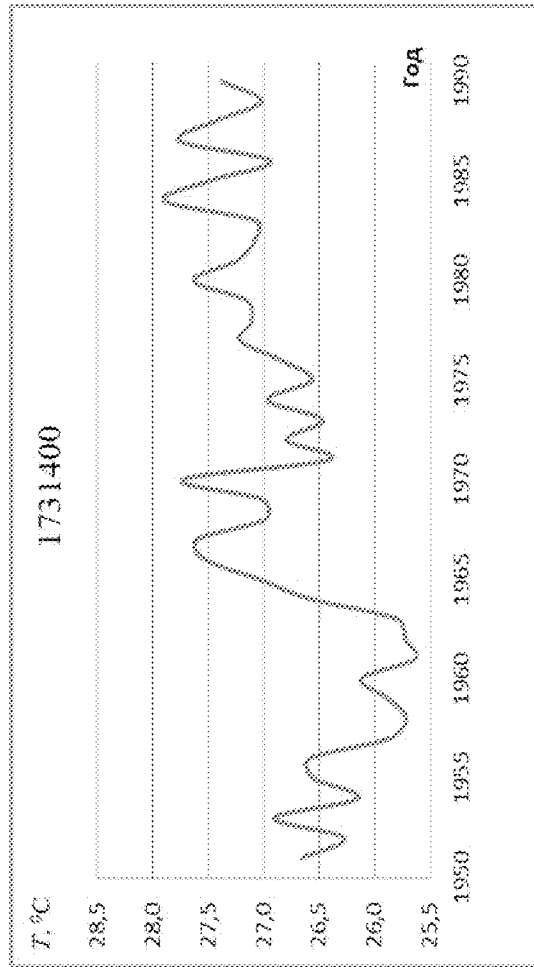
o')



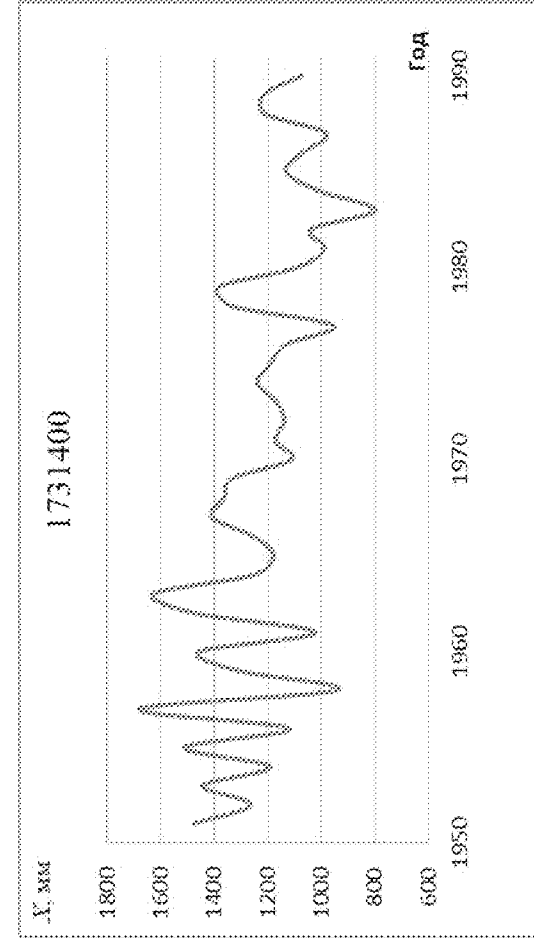
o)



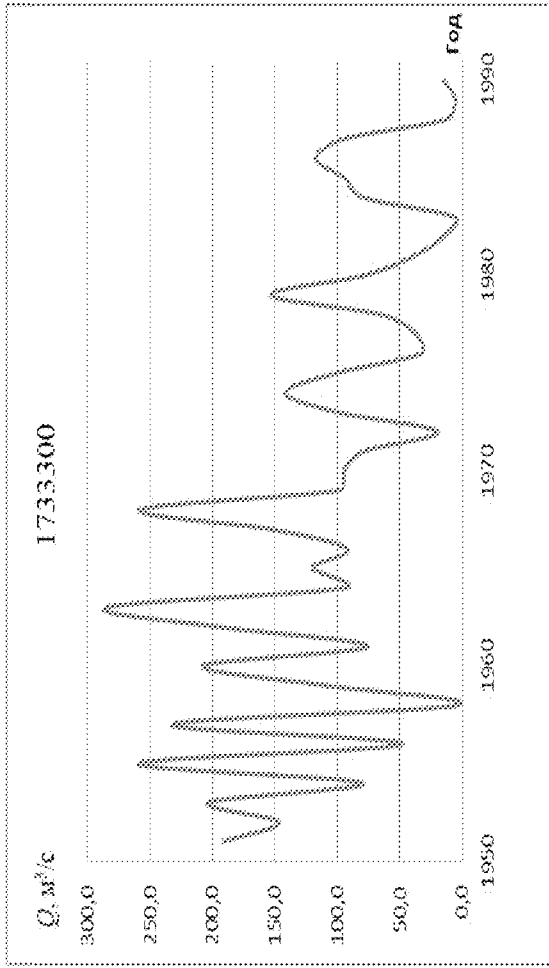
o'')



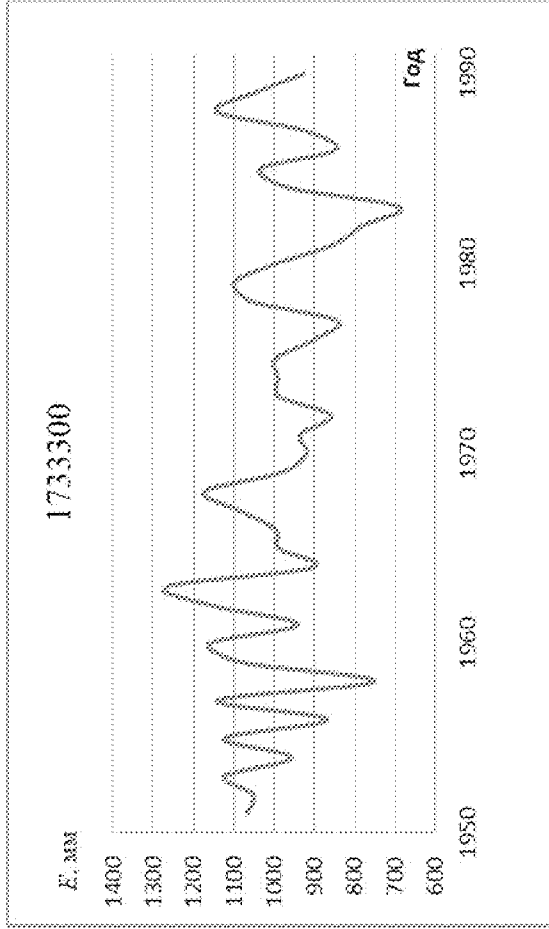
o''')



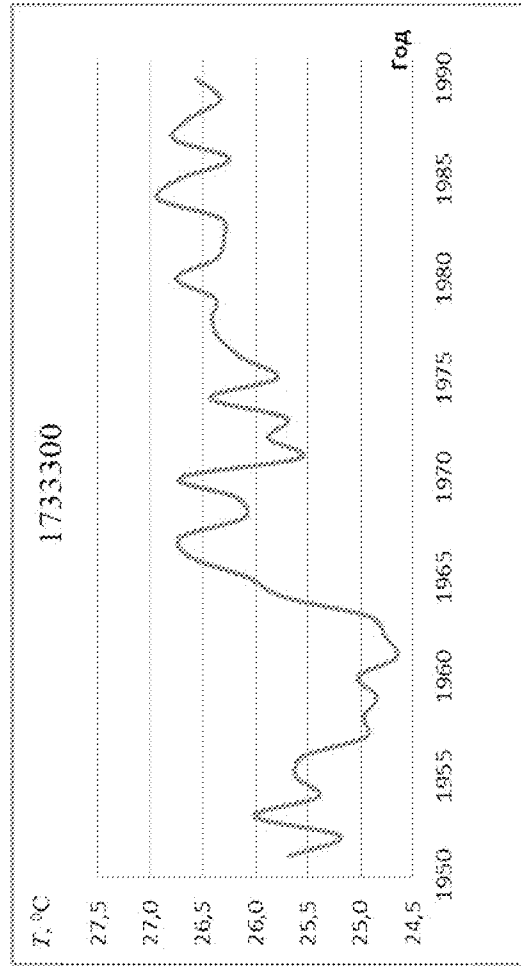
n)



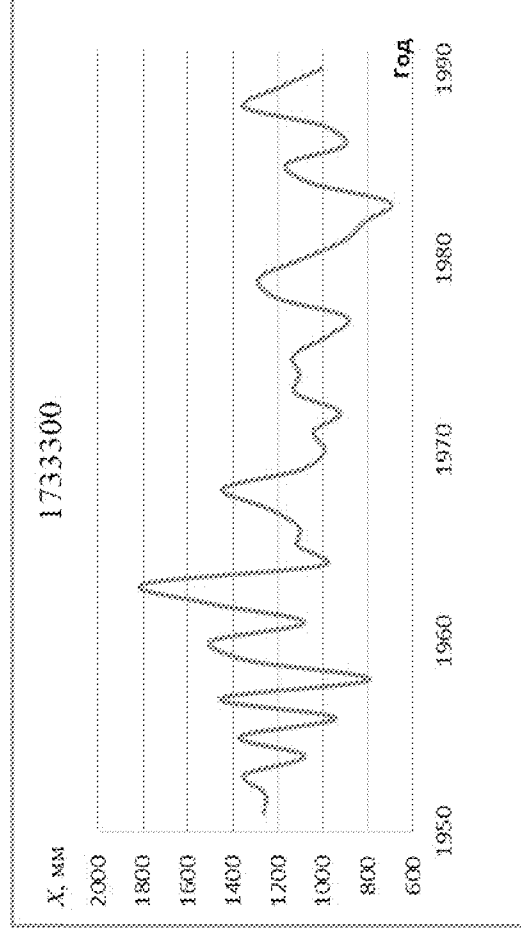
n')



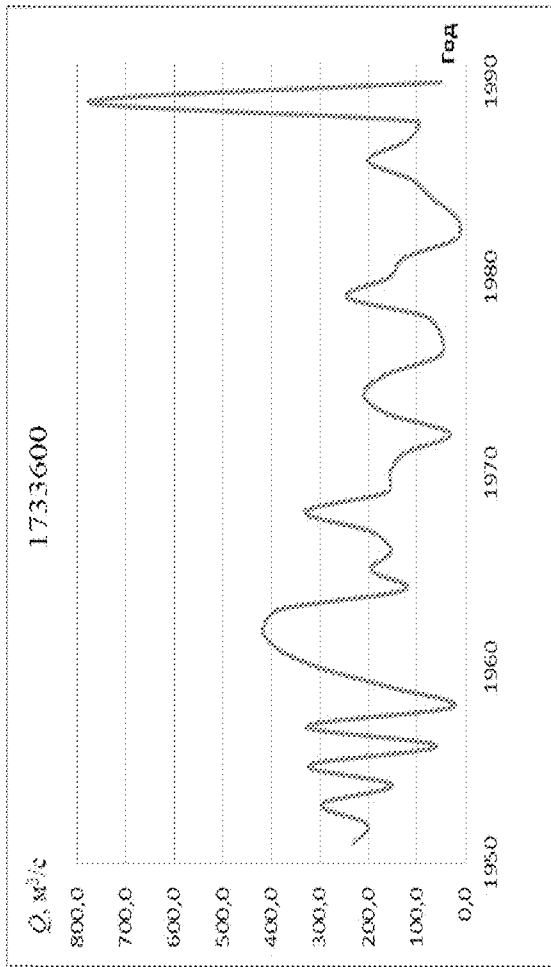
n'')



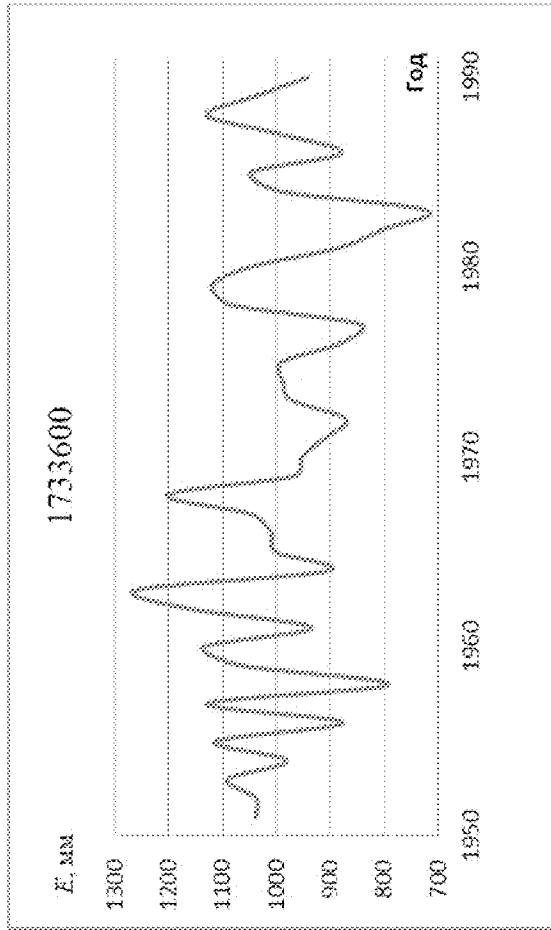
n''')



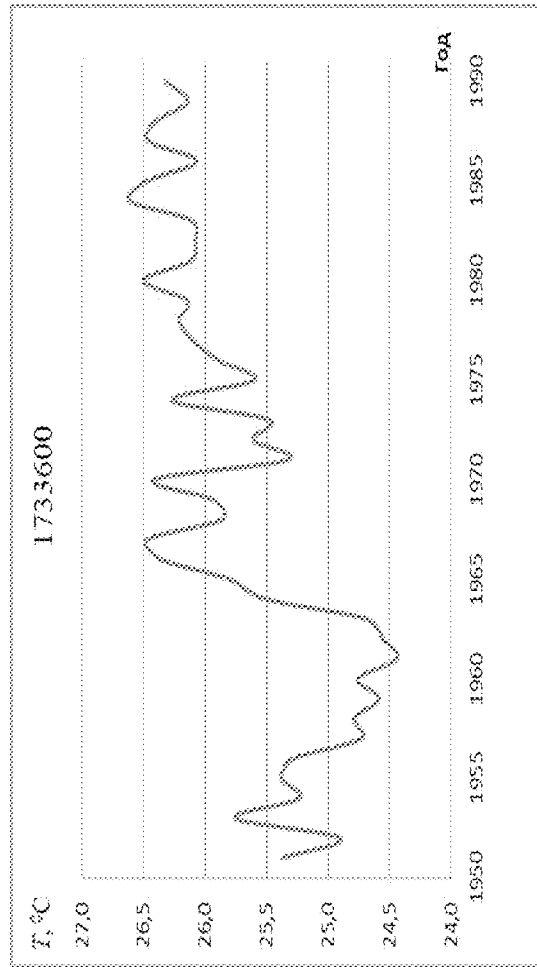
p)



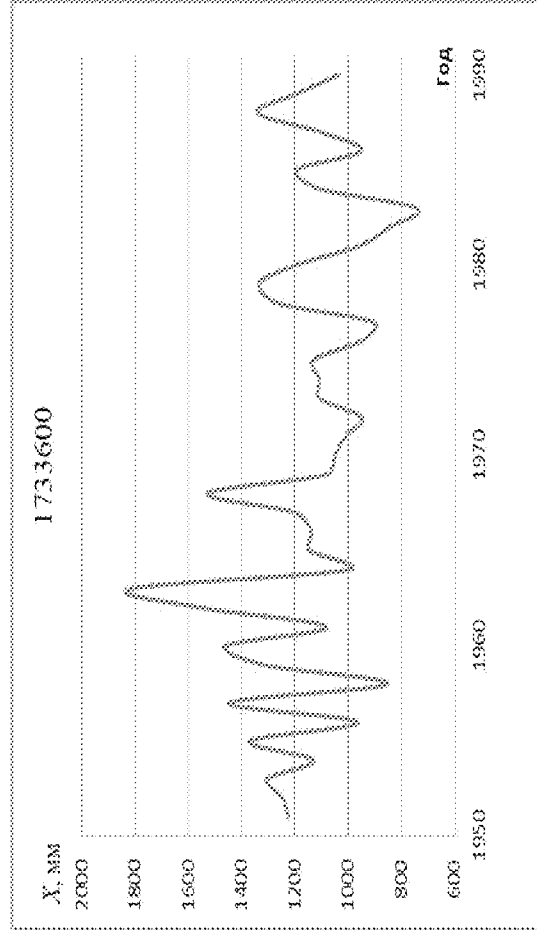
p')



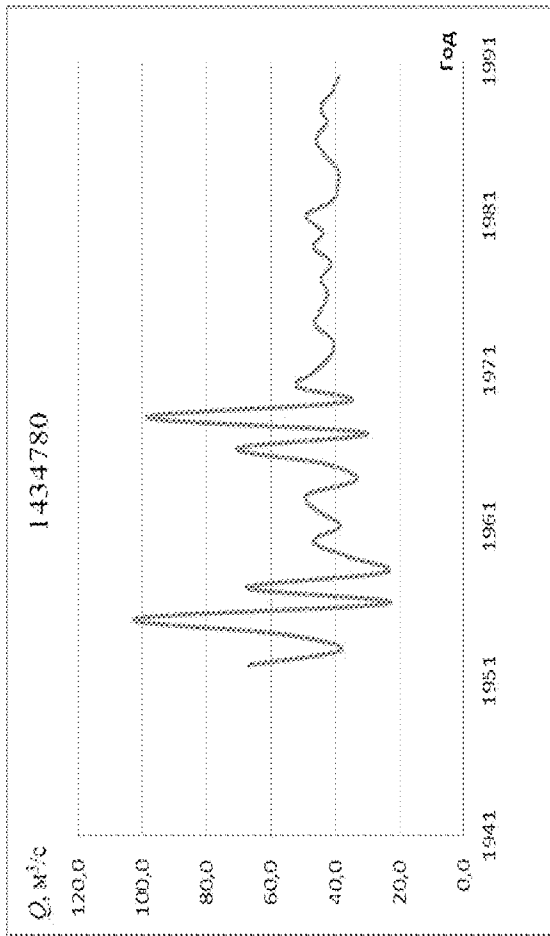
p'')



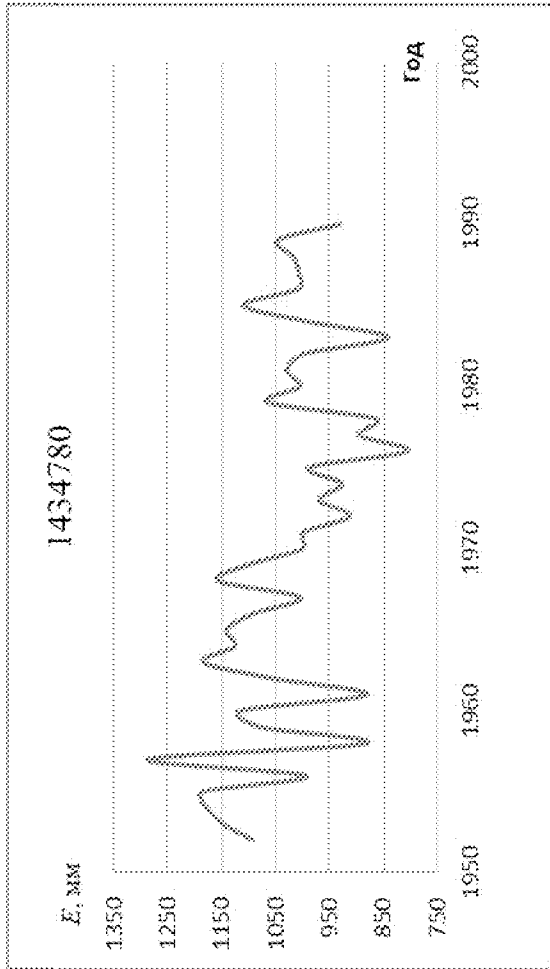
p''')



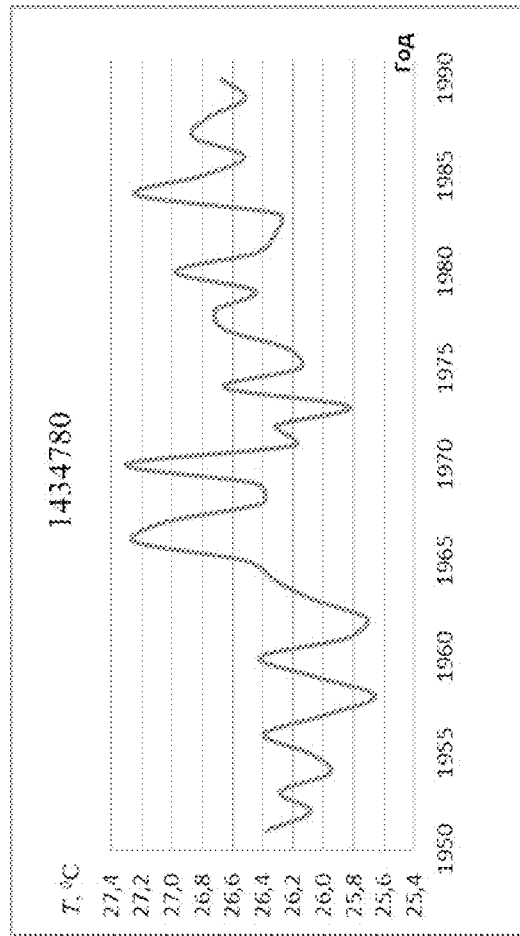
c')



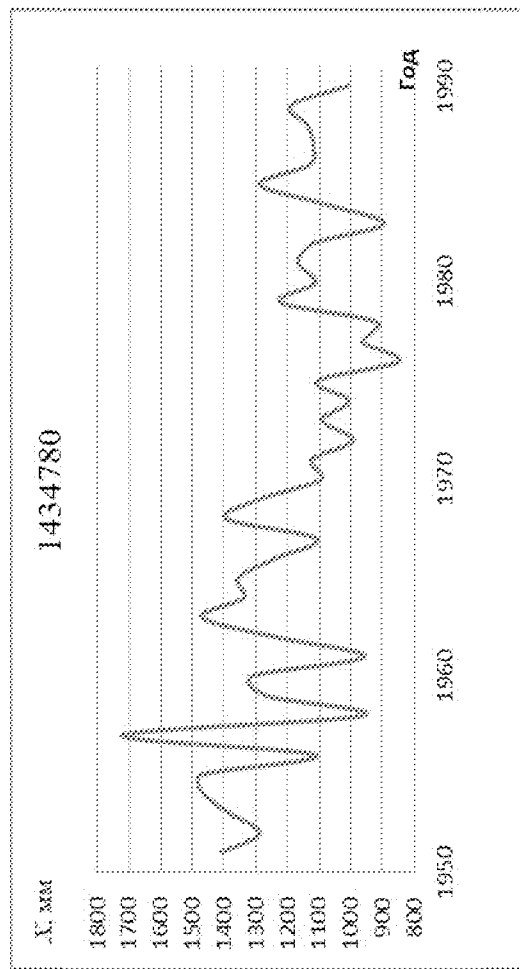
c'')



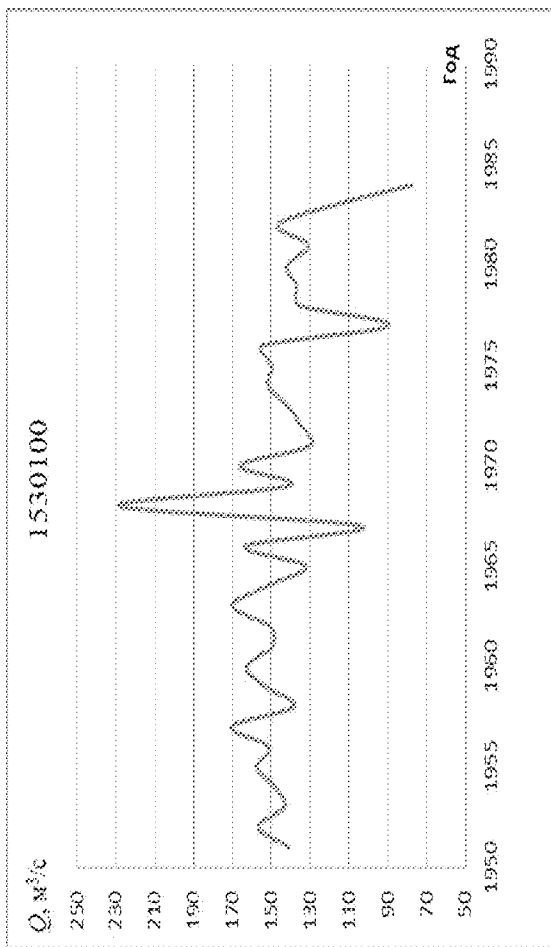
c''')



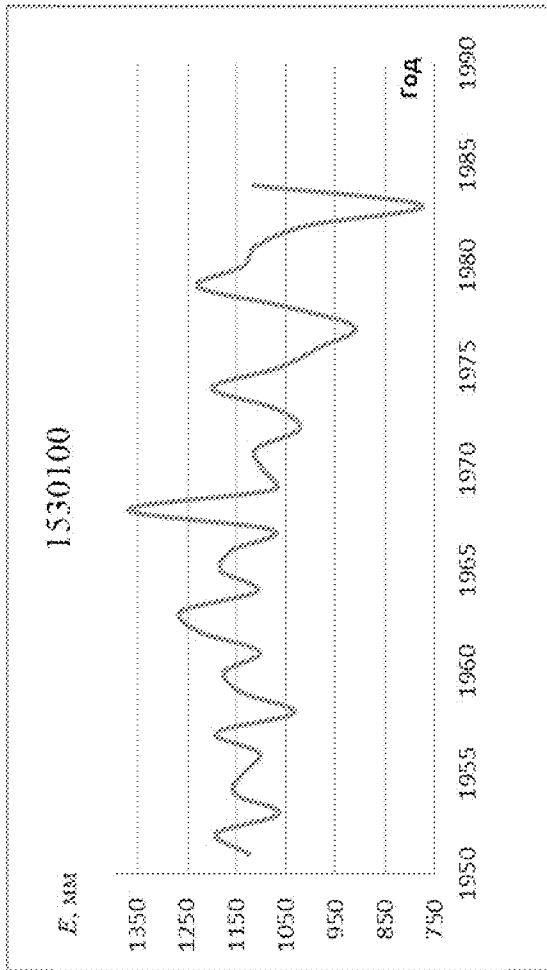
c''''



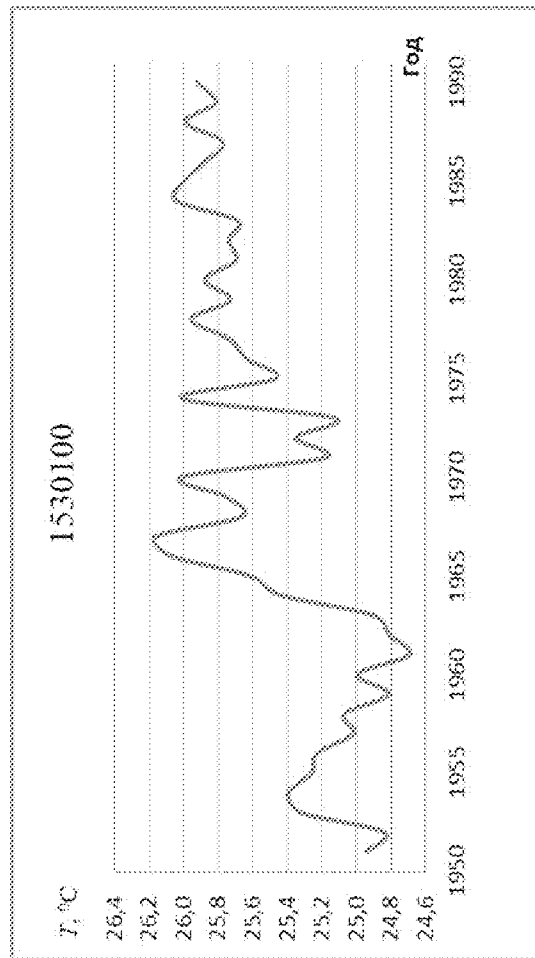
m)



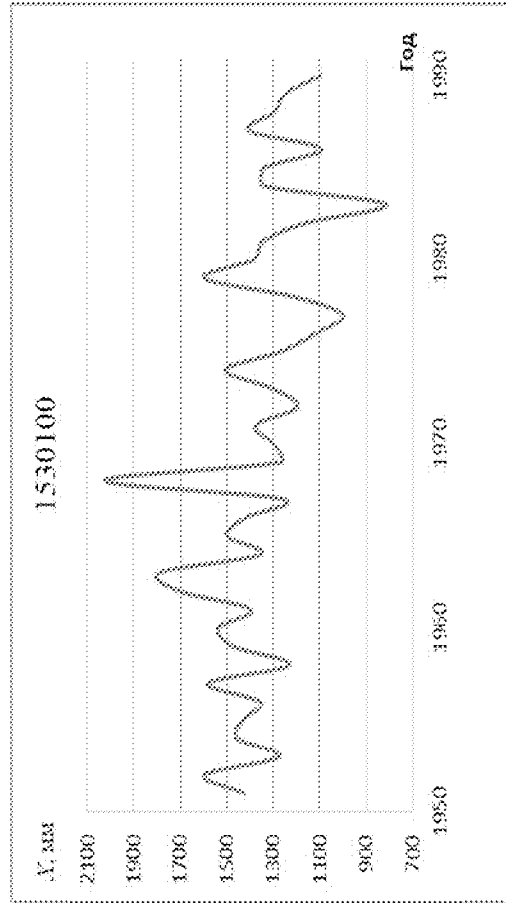
m')



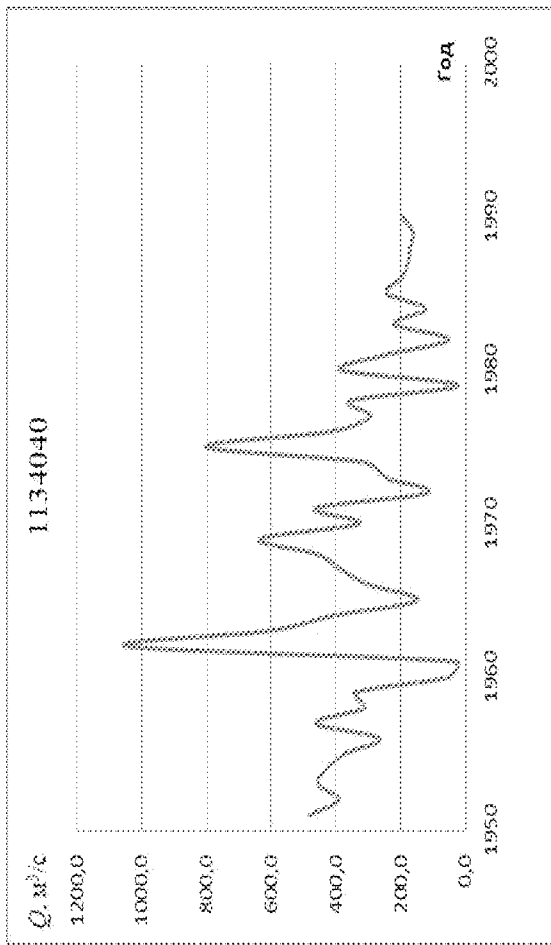
m'')



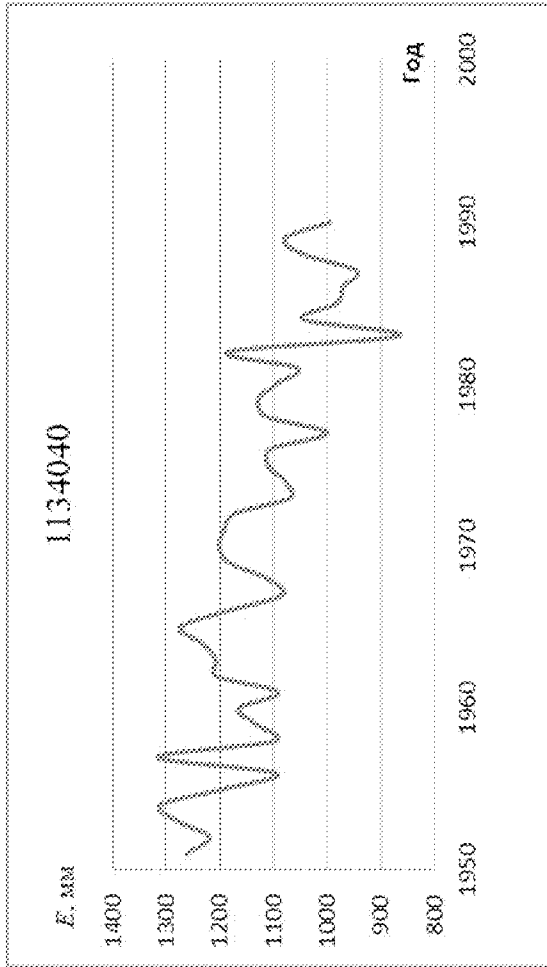
m''')



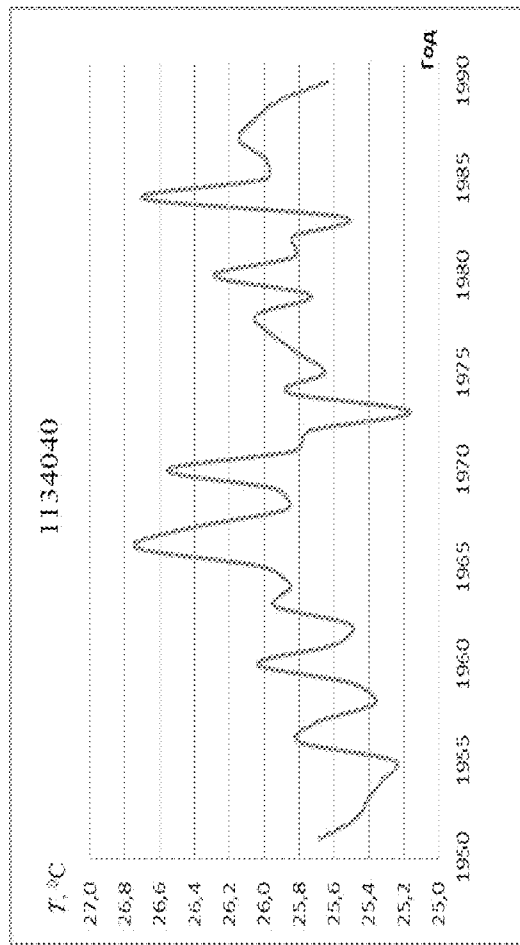
y)



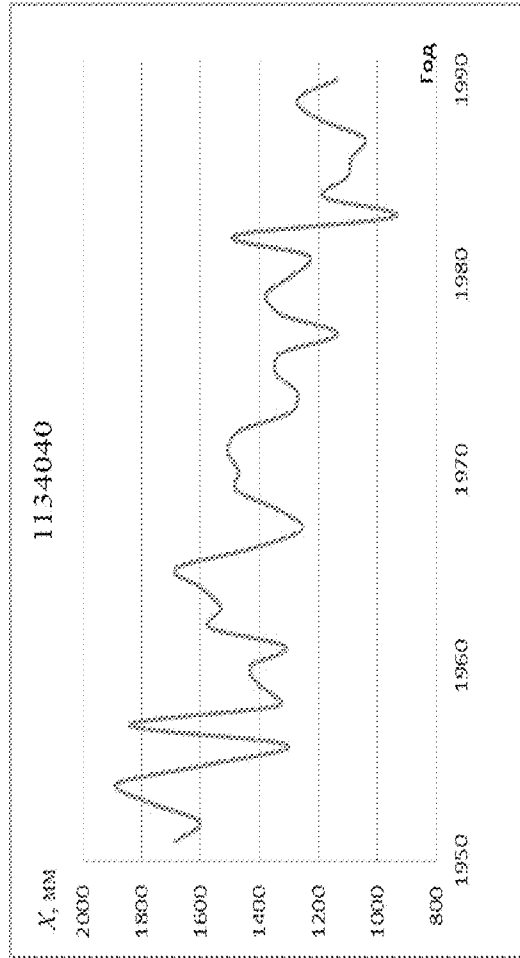
y')



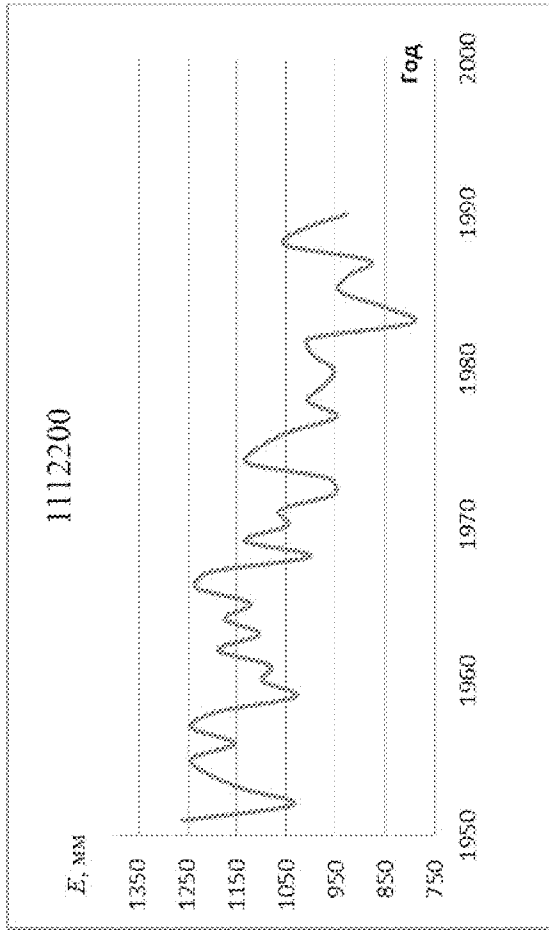
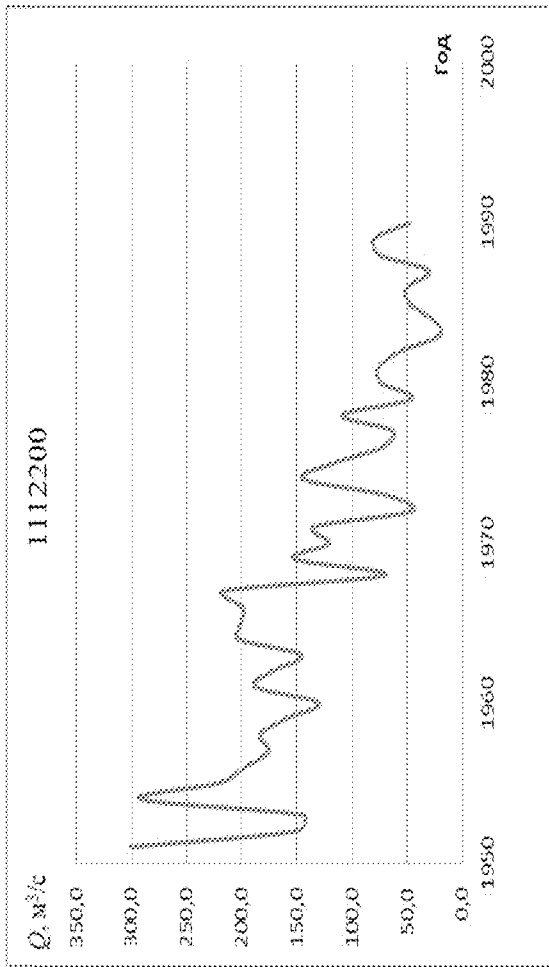
y'')



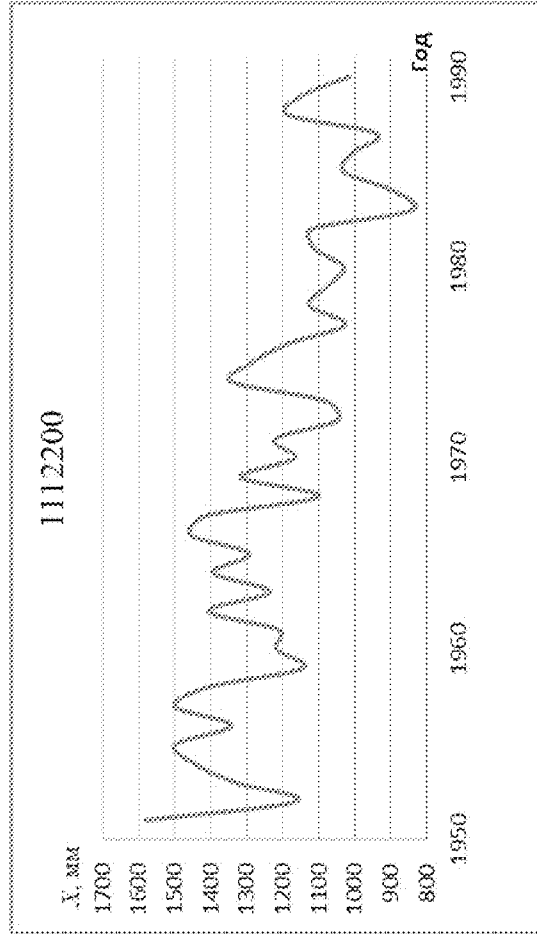
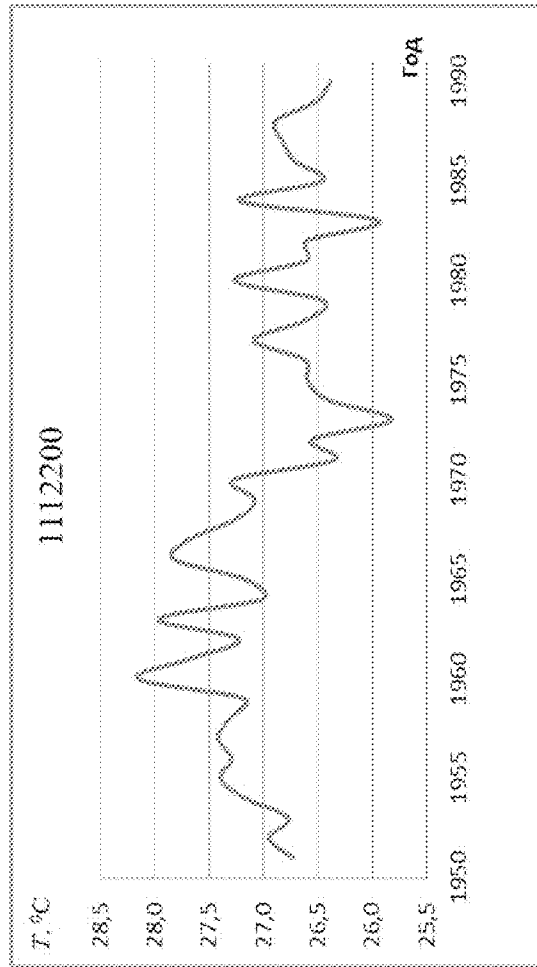
y''')



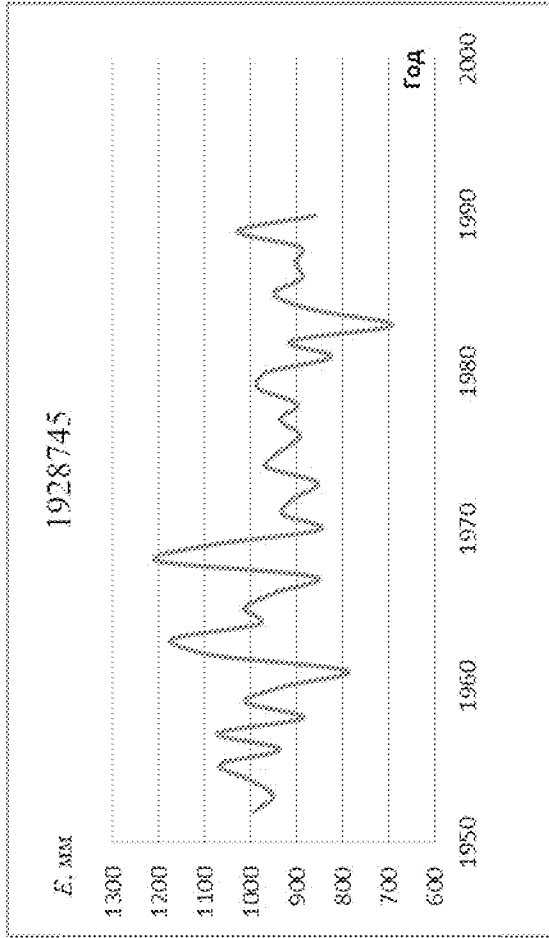
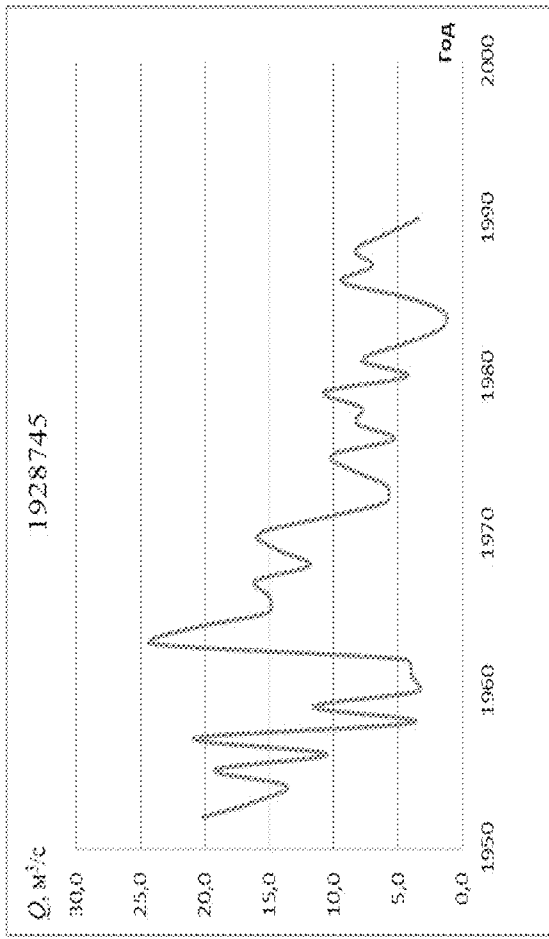
ϕ) ϕ')



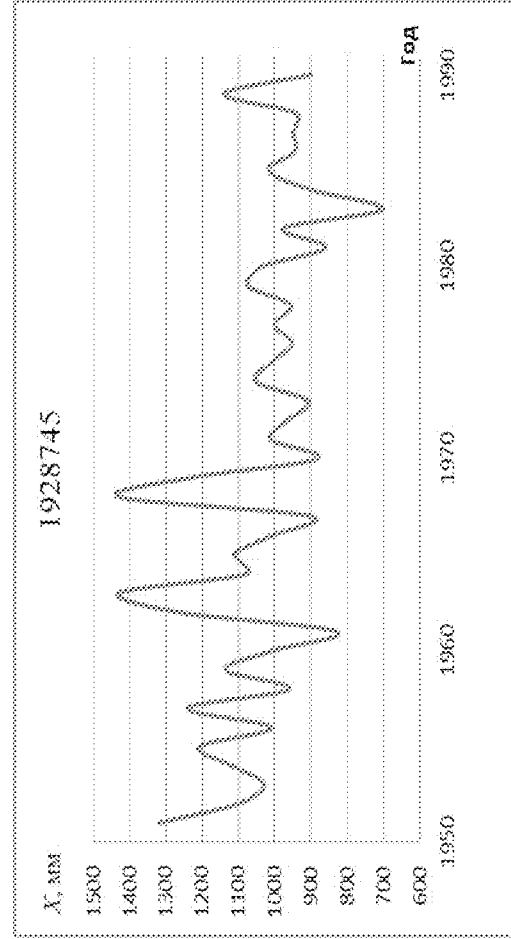
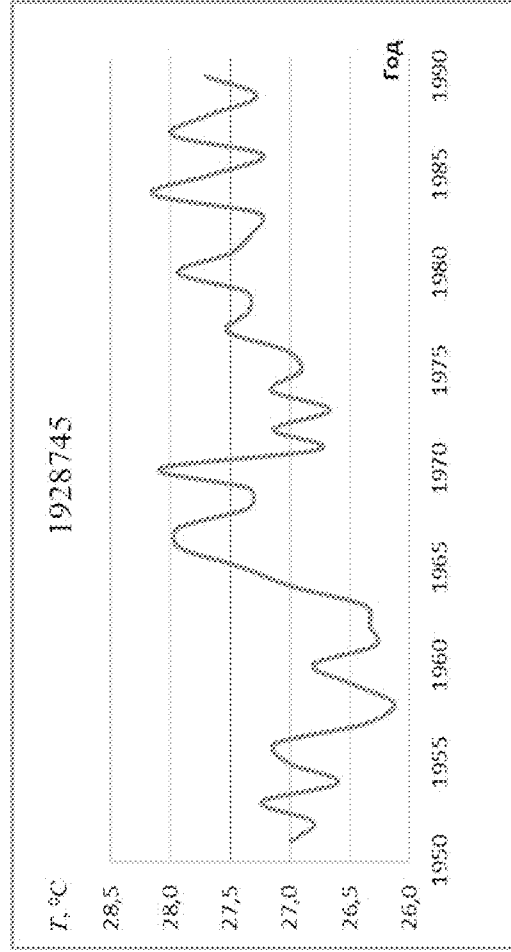
ϕ'') ϕ''')



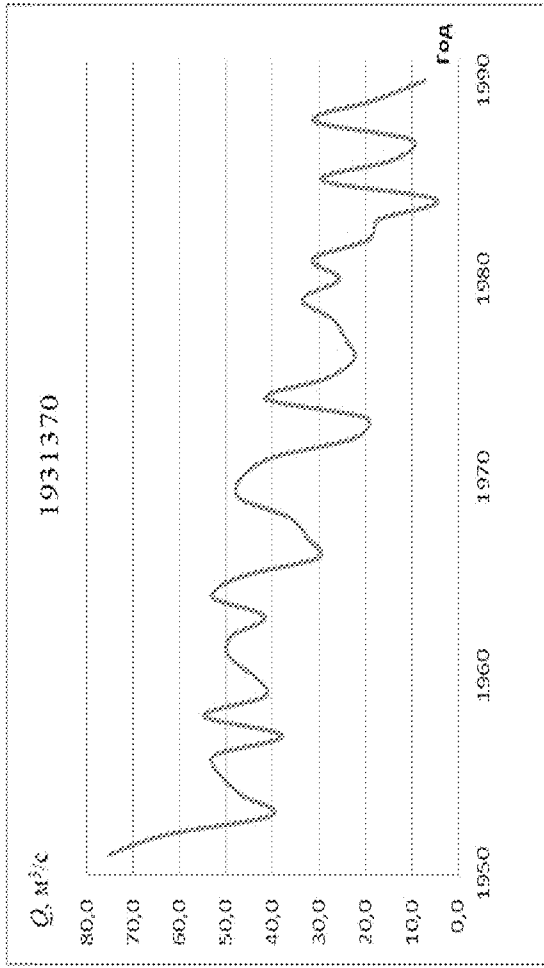
x) x')



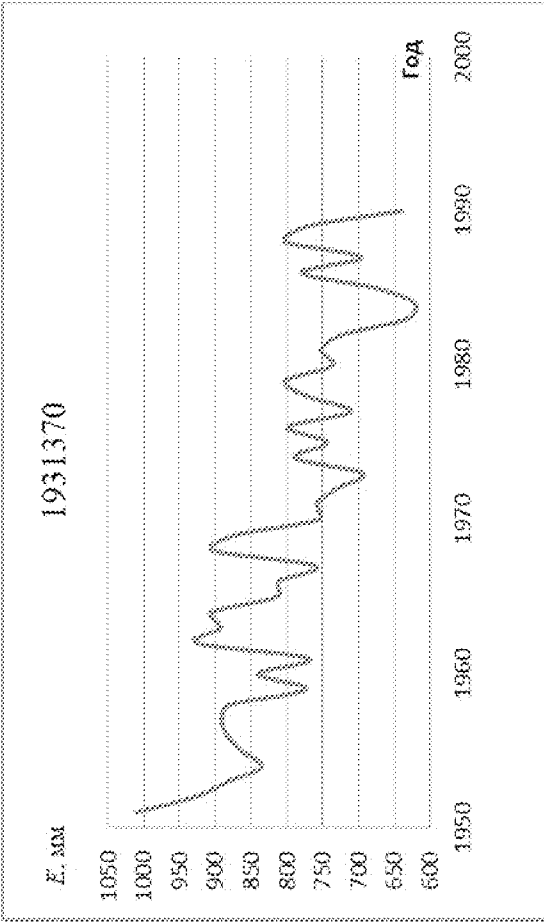
x'') x''')



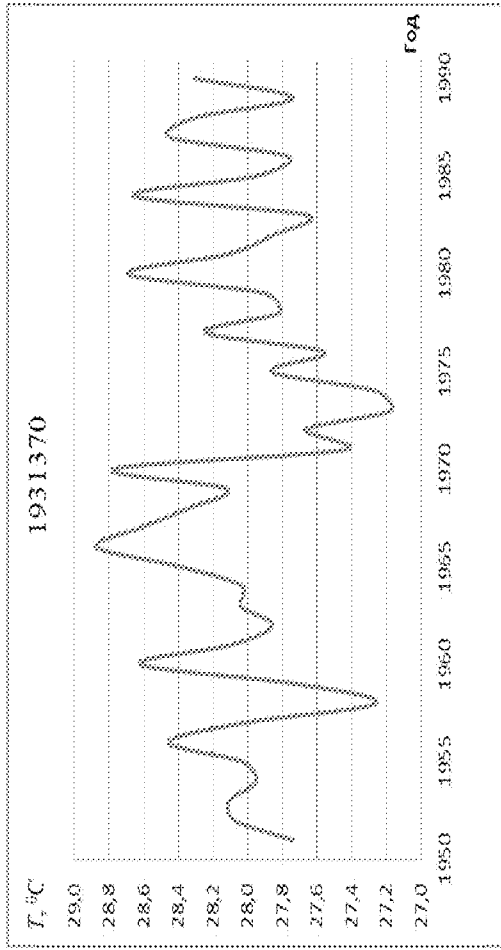
u)



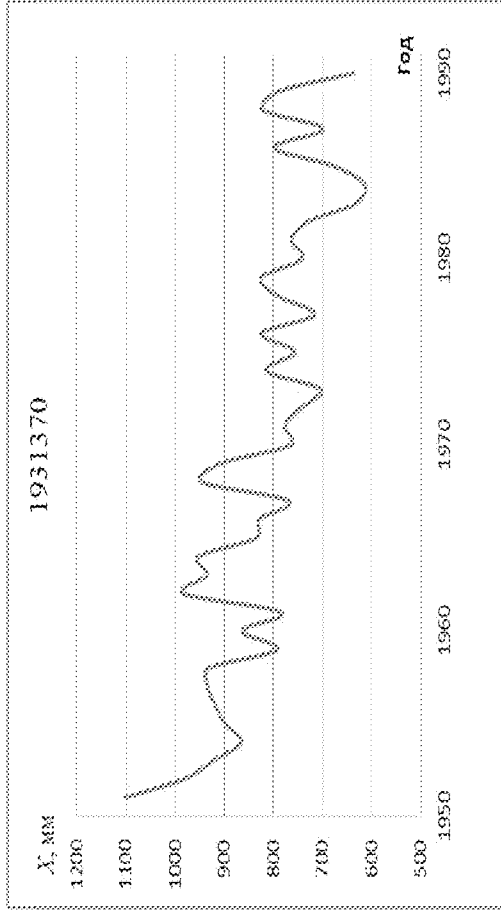
u')



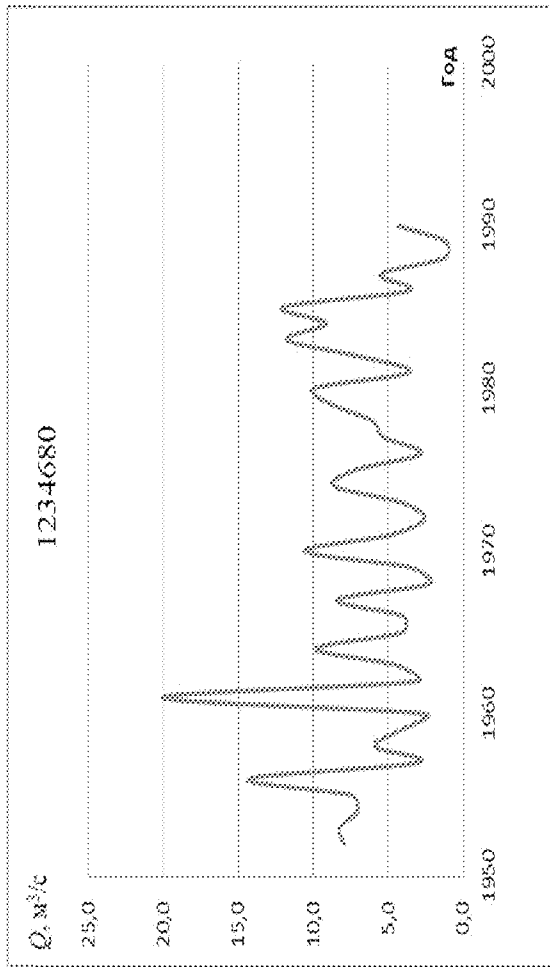
u'')



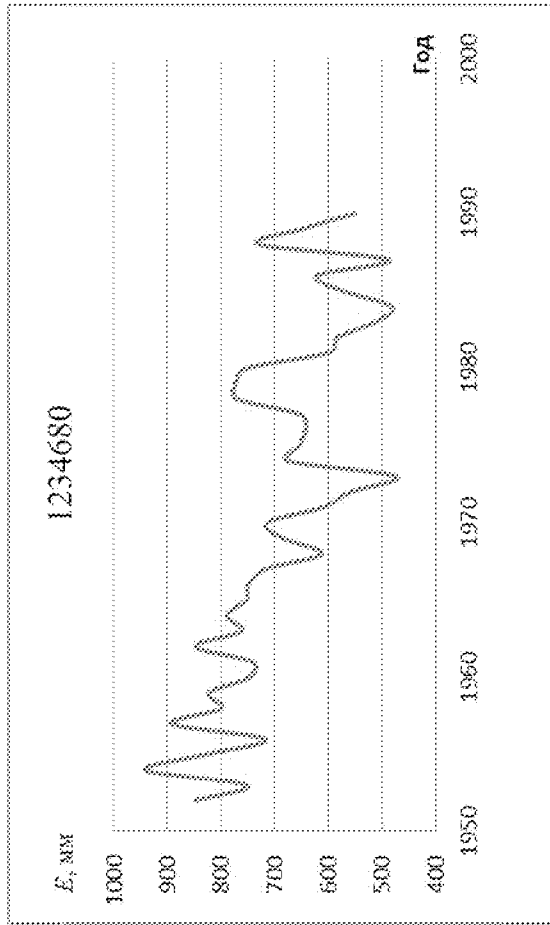
u''')



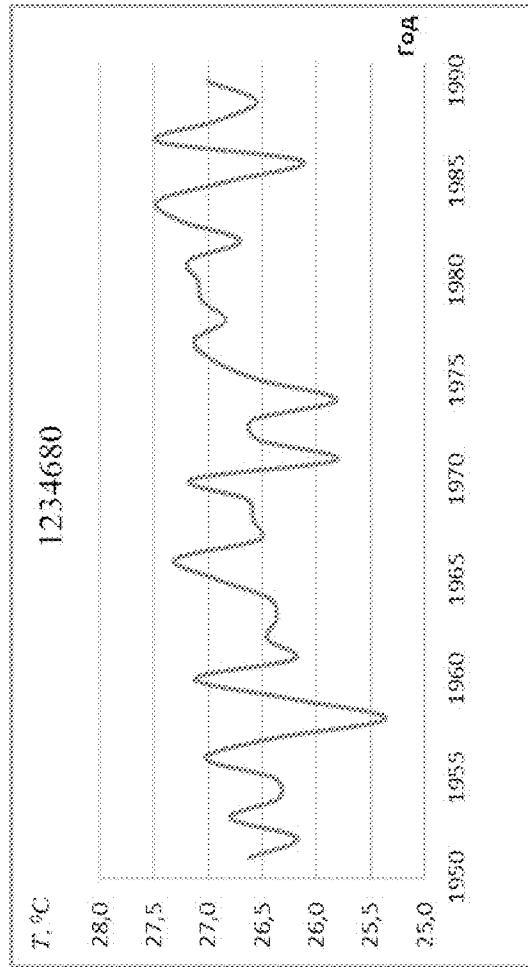
4)



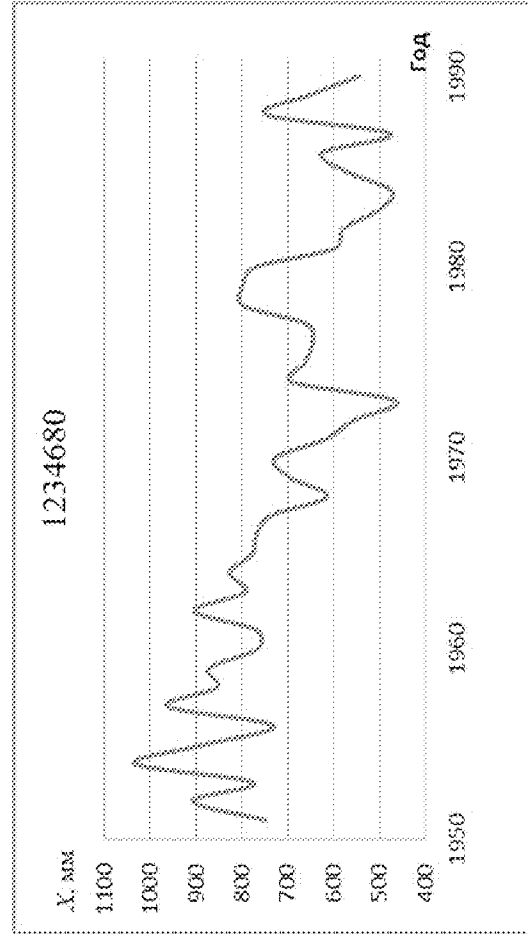
4')



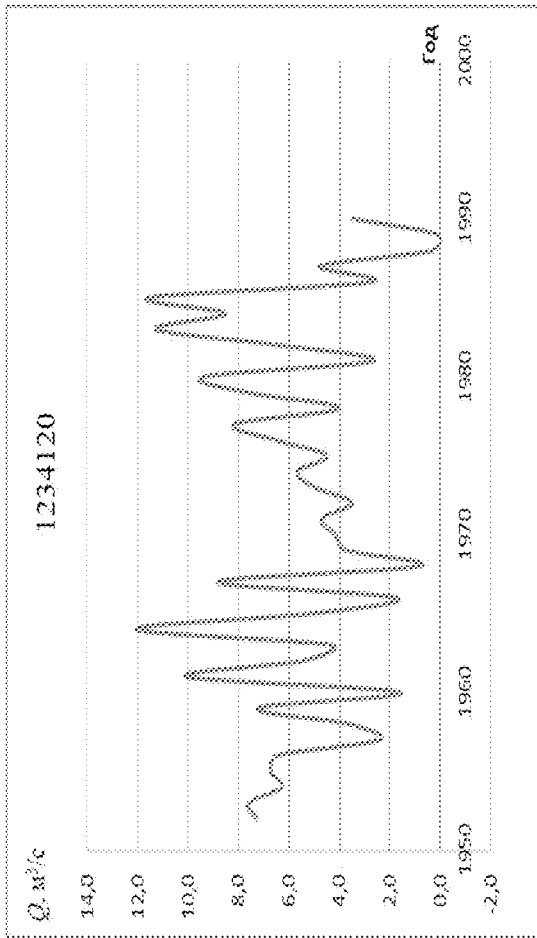
4'')



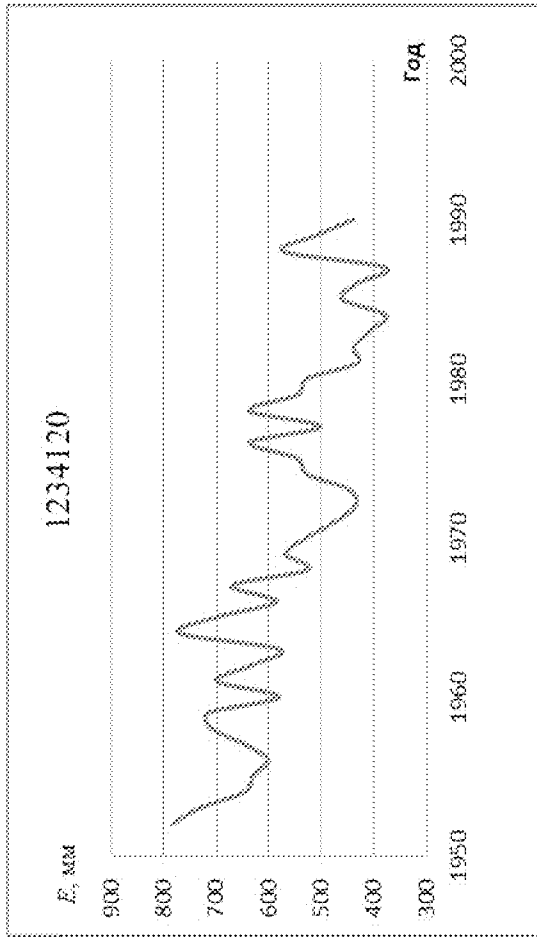
4''')



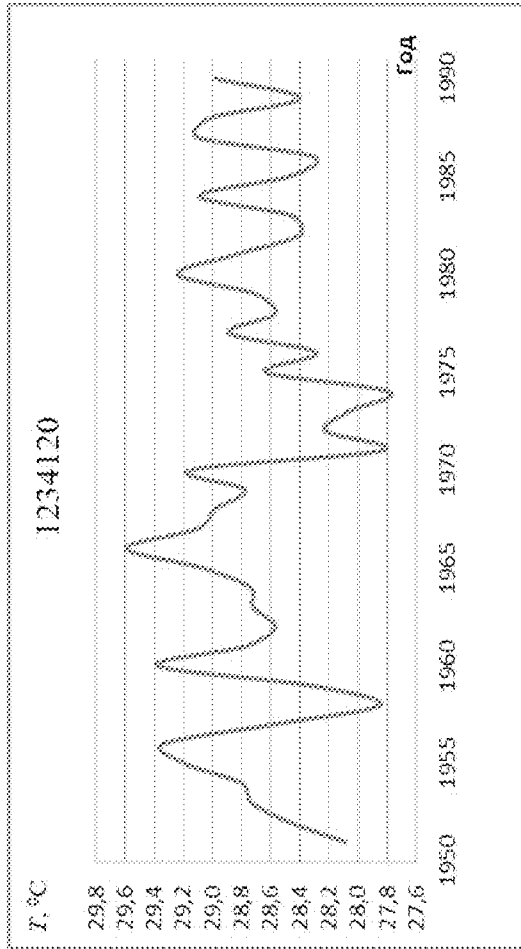
w)



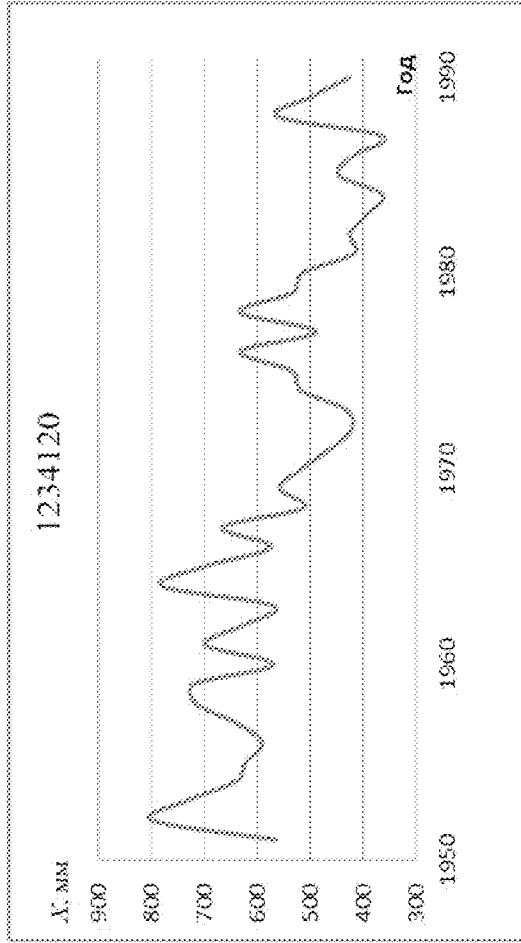
w')



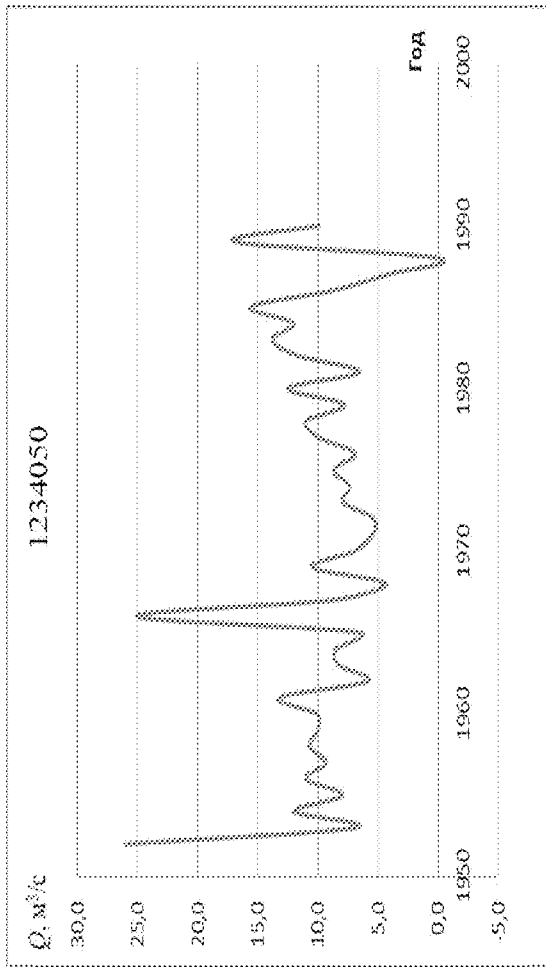
w'')



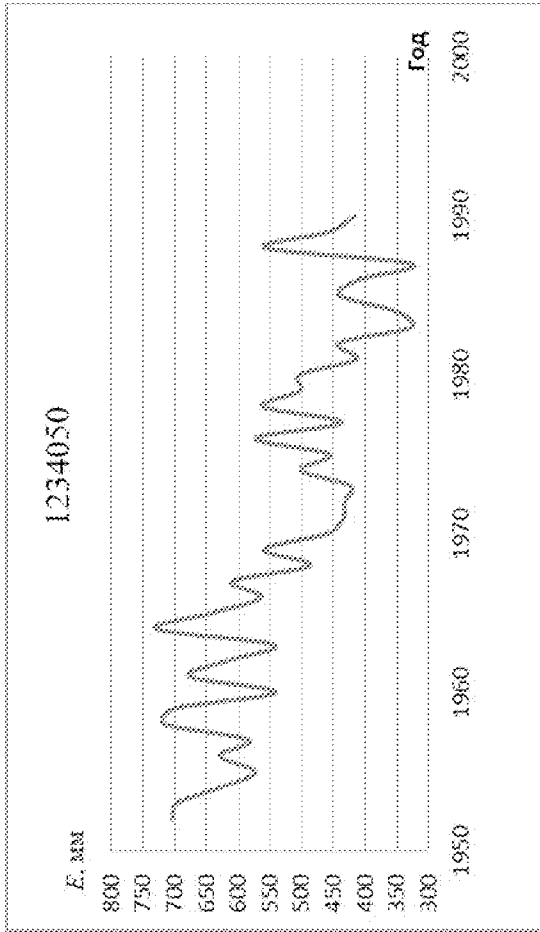
w''')



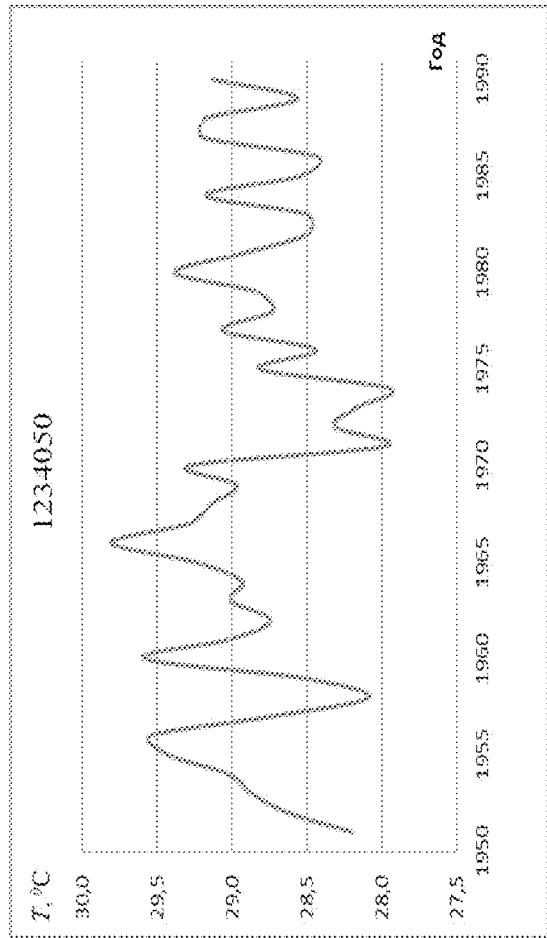
u_f'



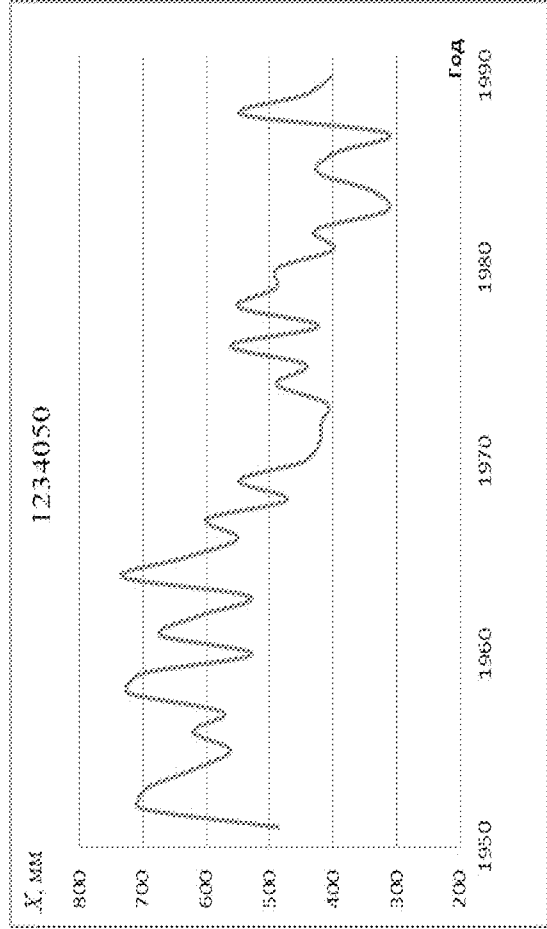
u_f''



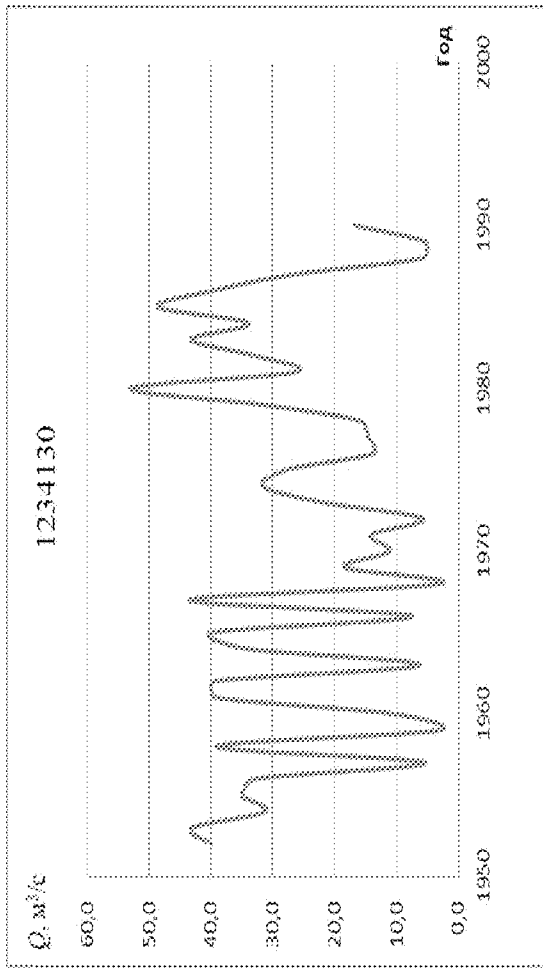
u_f'''



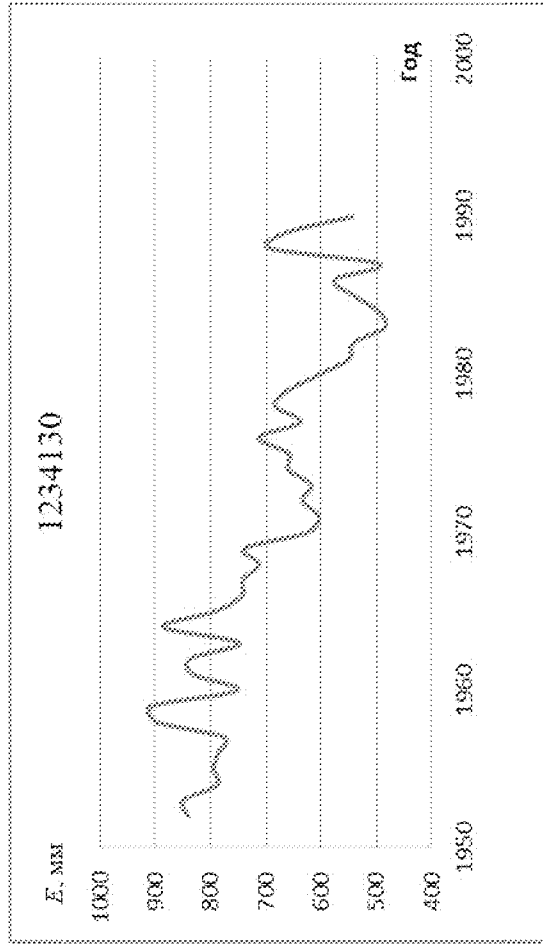
u_f''''



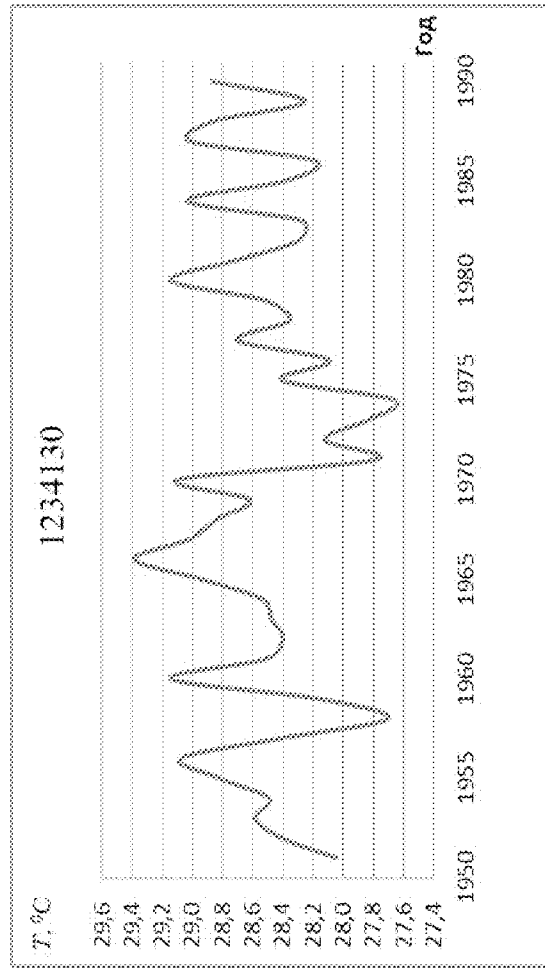
а)



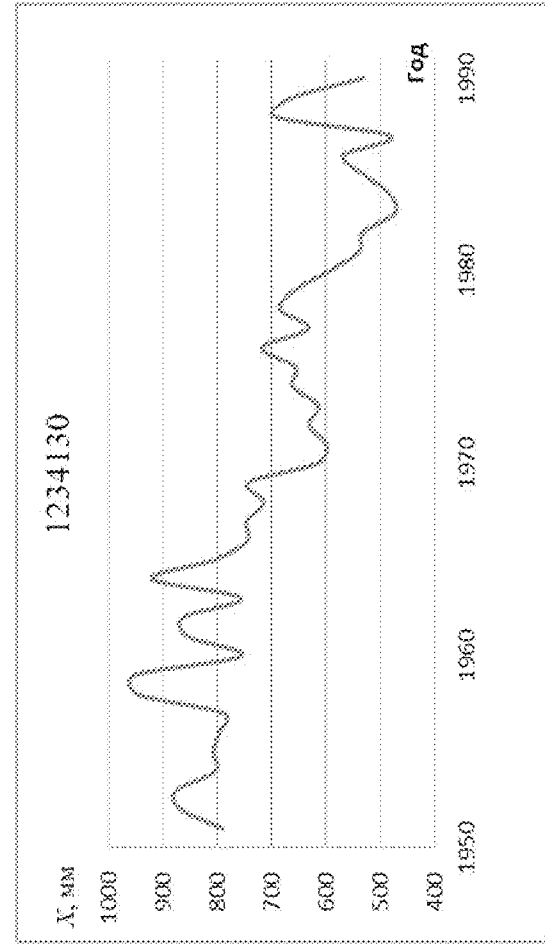
б)



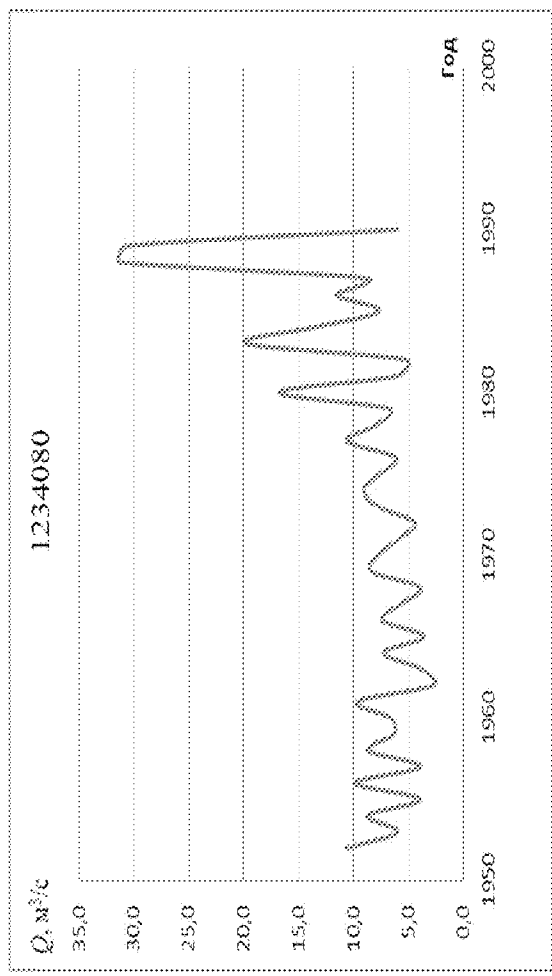
в)



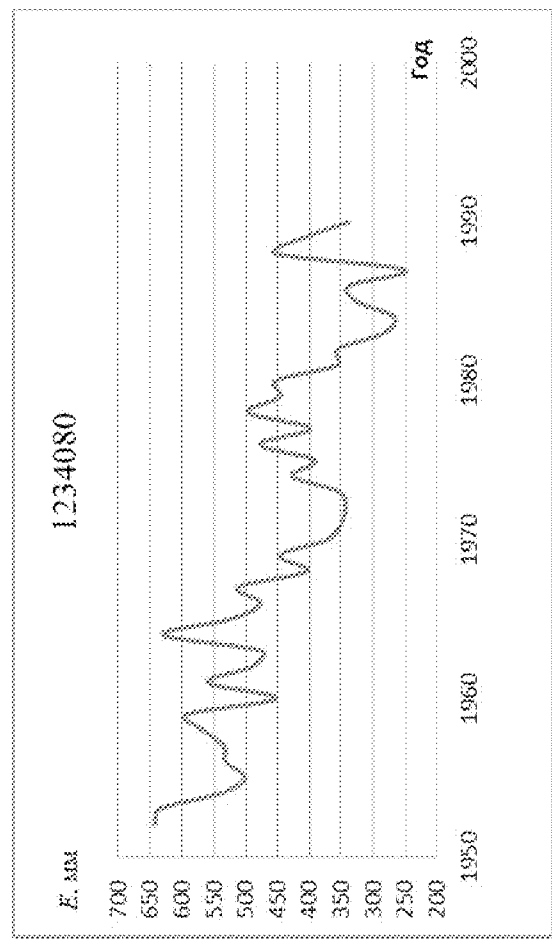
г)



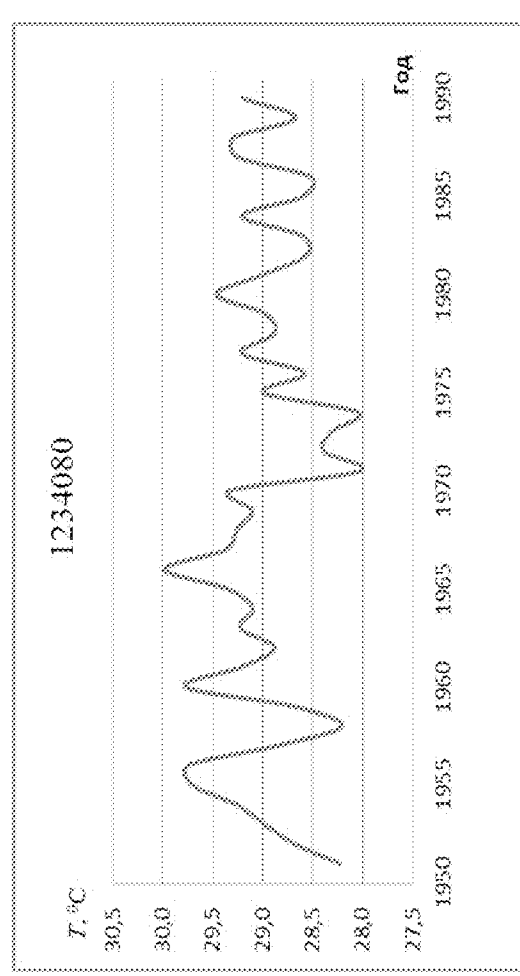
10)



10')



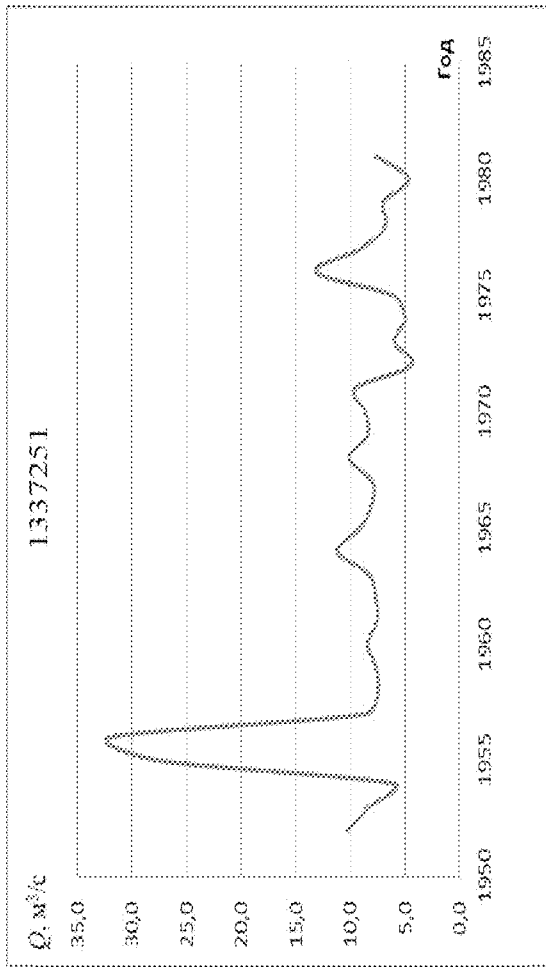
10'')



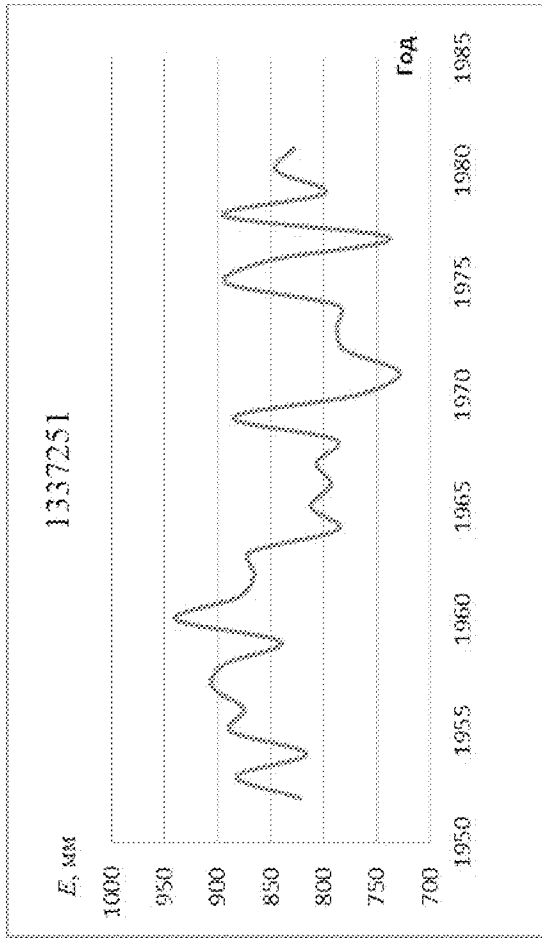
10''')



г)



г')



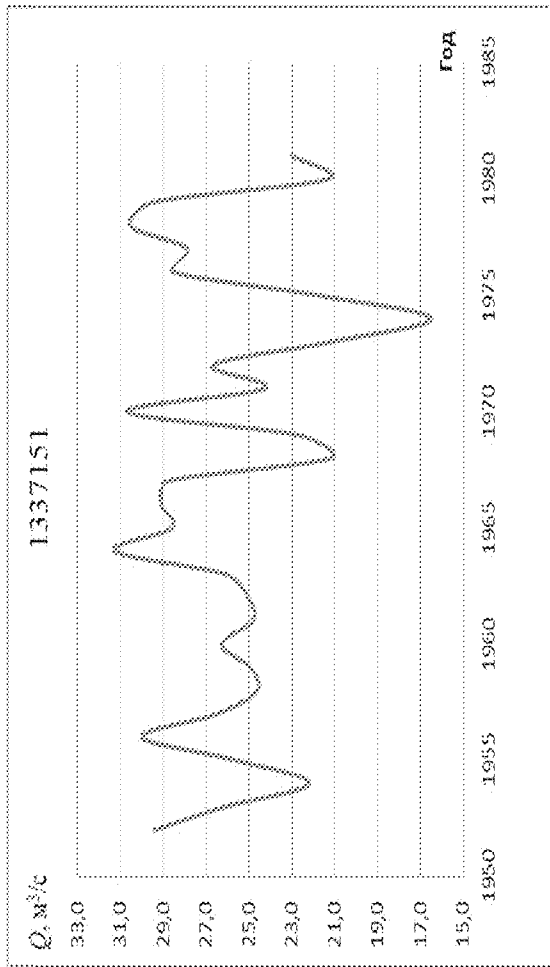
г''



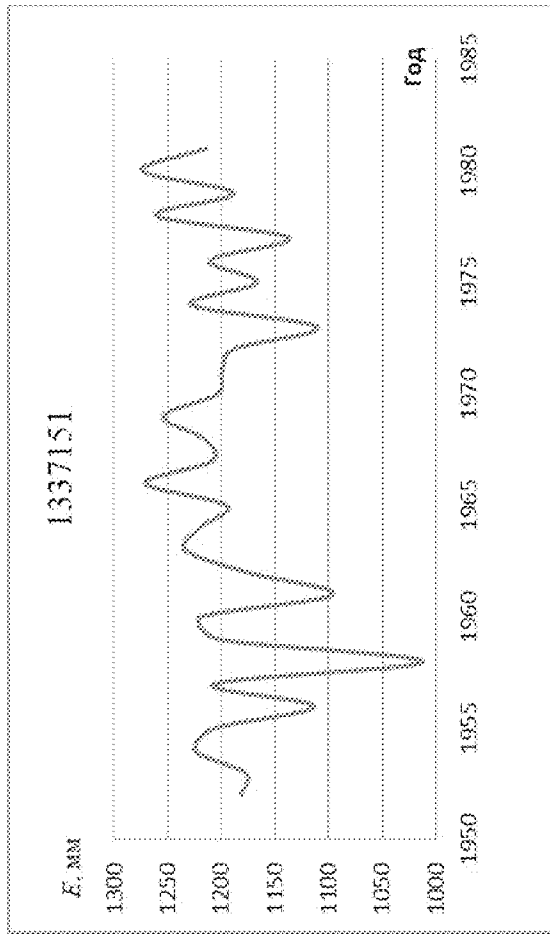
г''')



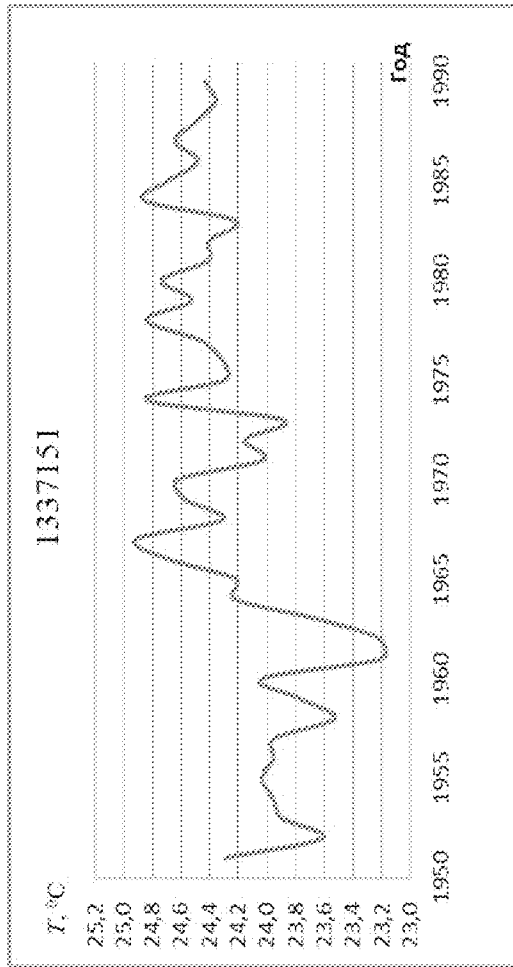
aa')



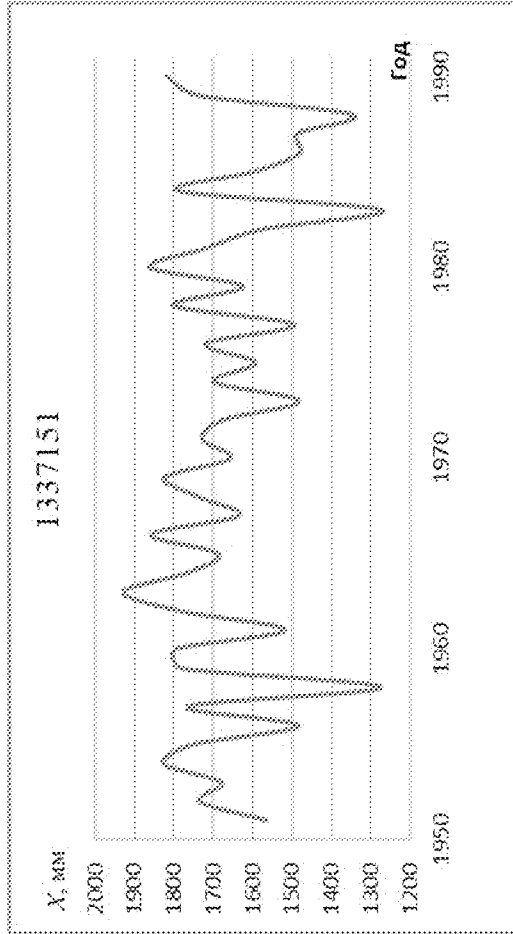
aa'')



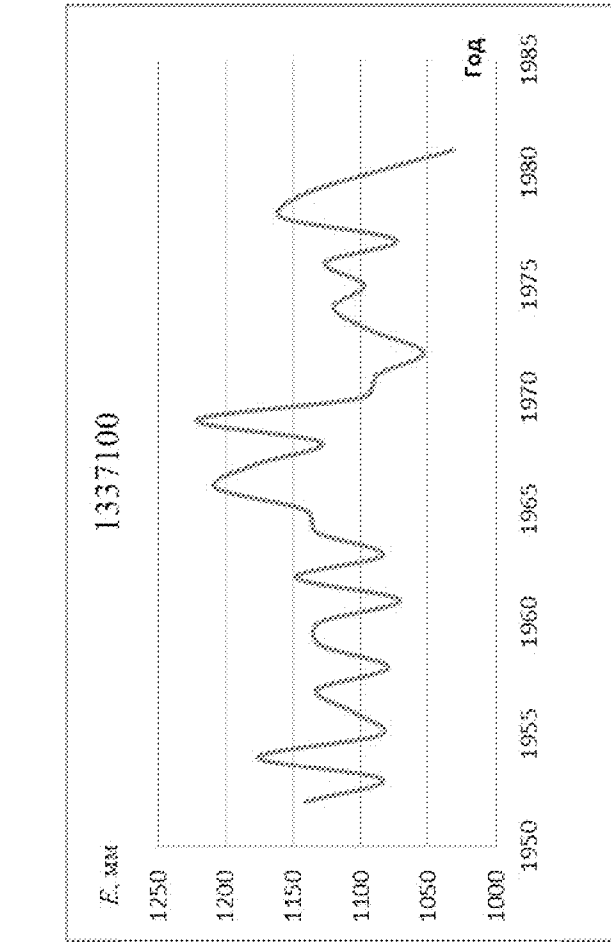
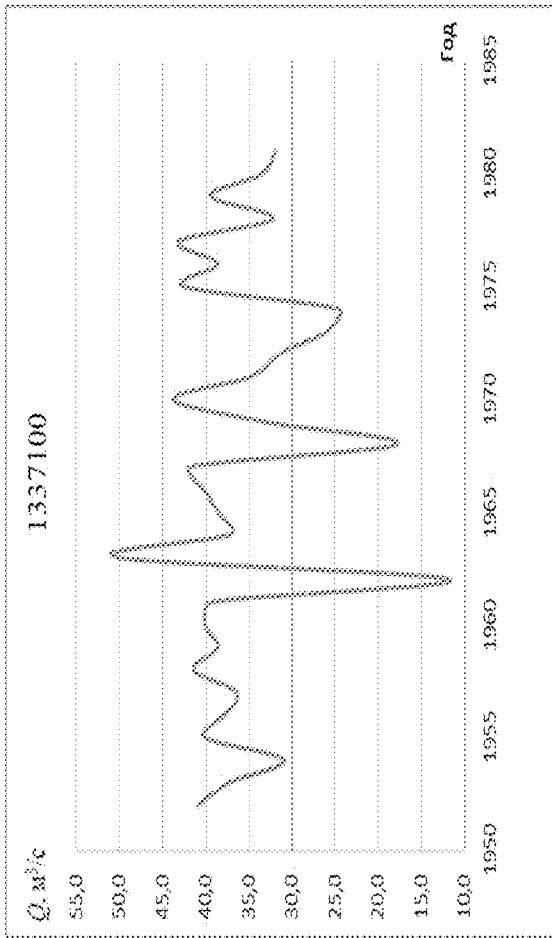
aa''')



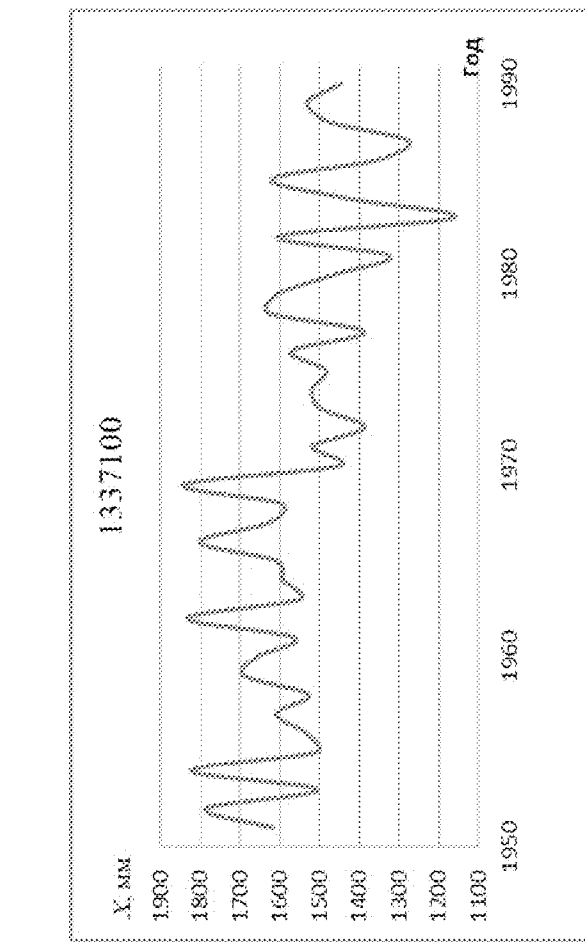
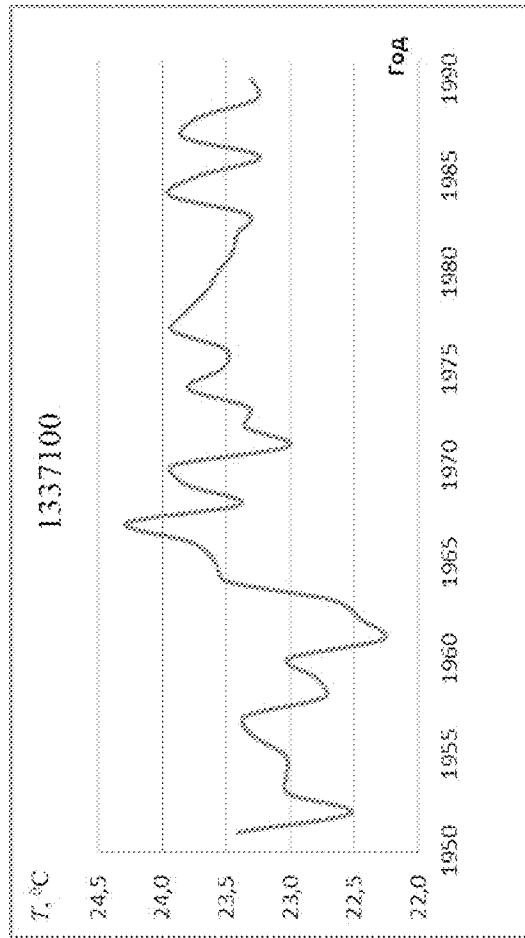
aa''''



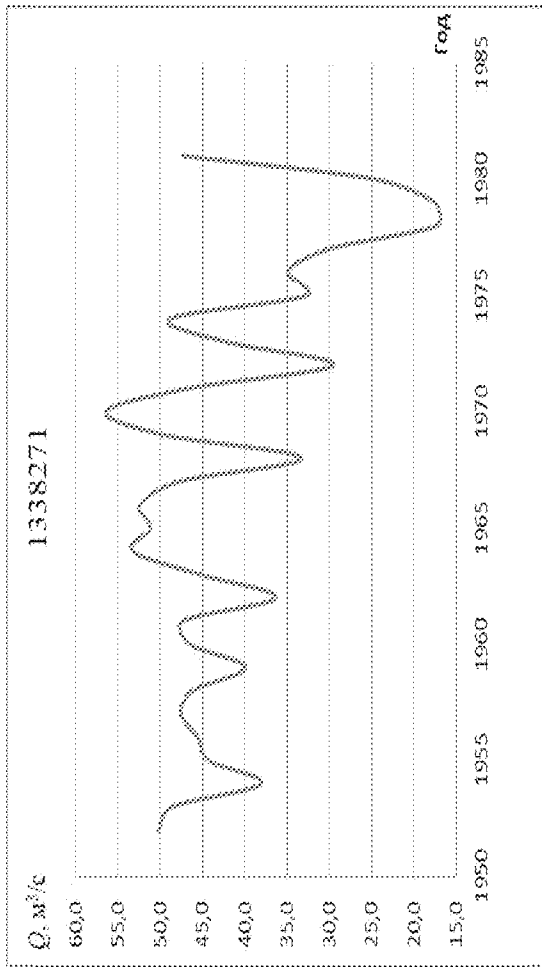
aб) $\sigma\delta'$



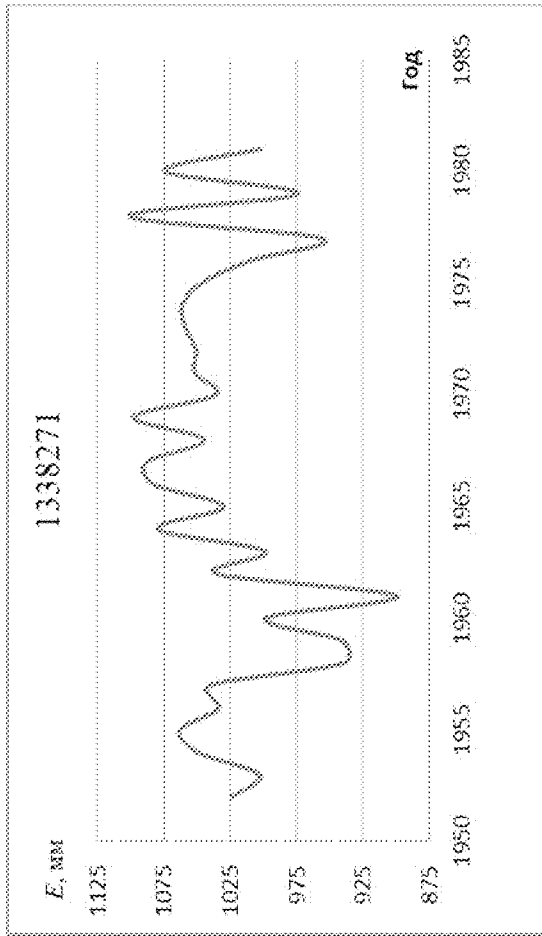
aб'') $\sigma\delta''$



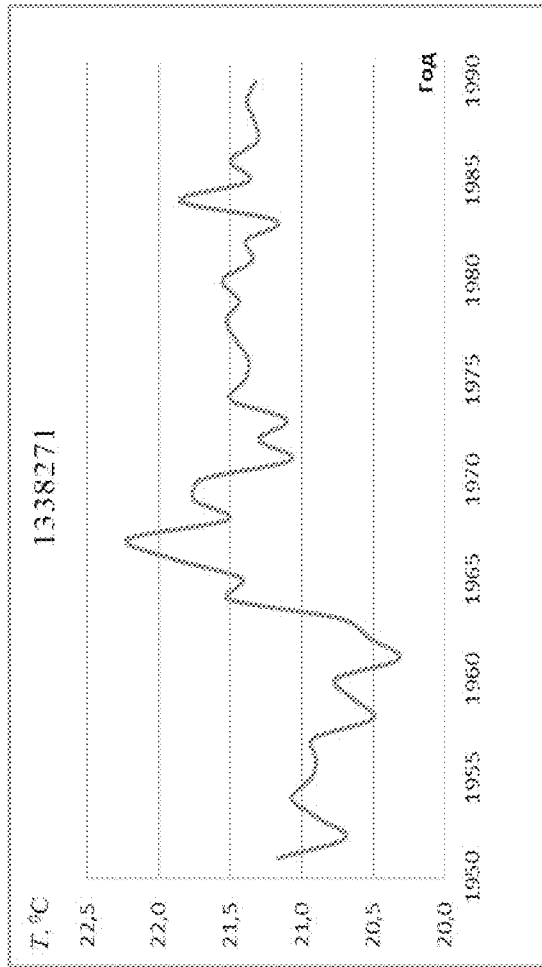
a6')



a6')

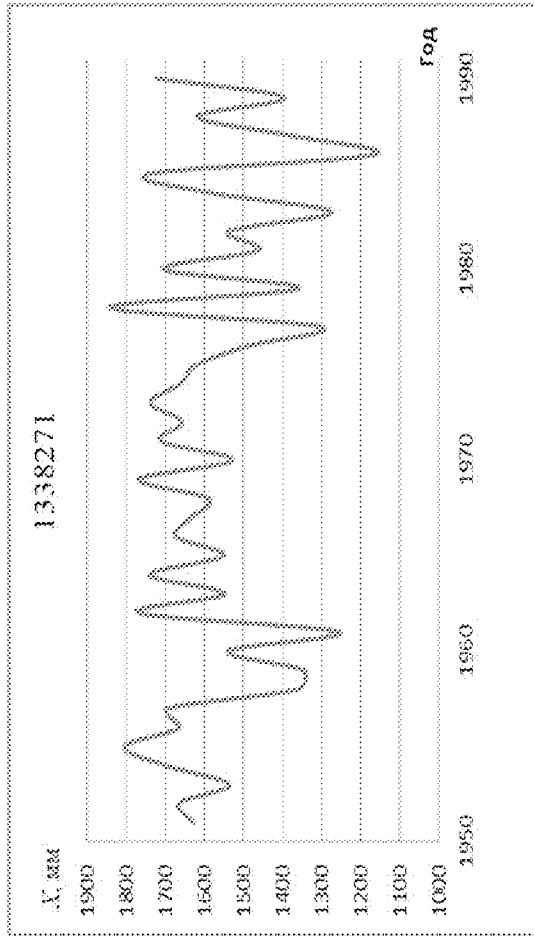


a6'')

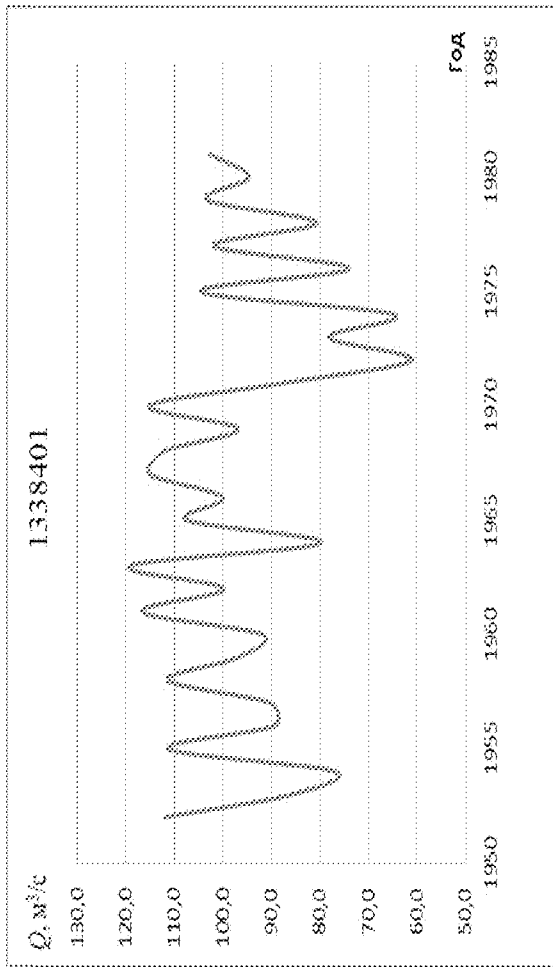


a6'')

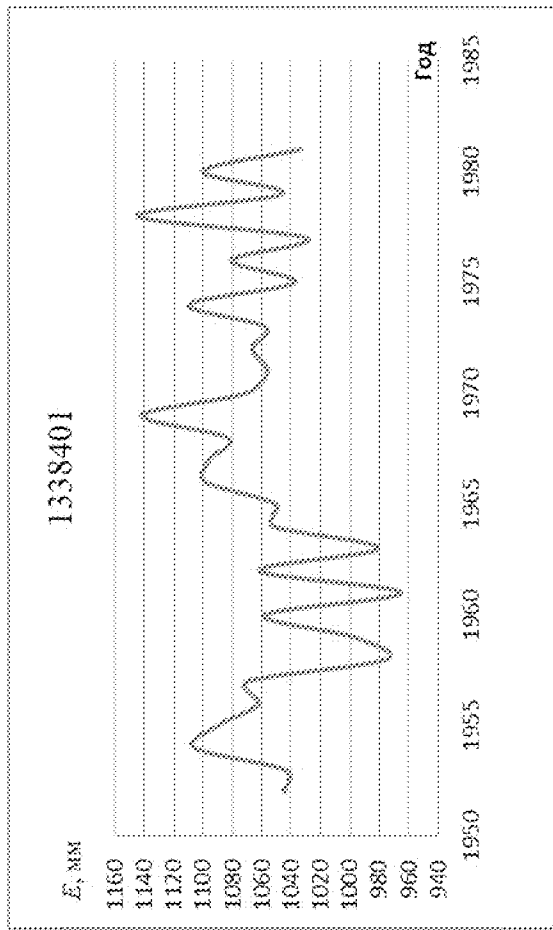
a6''')



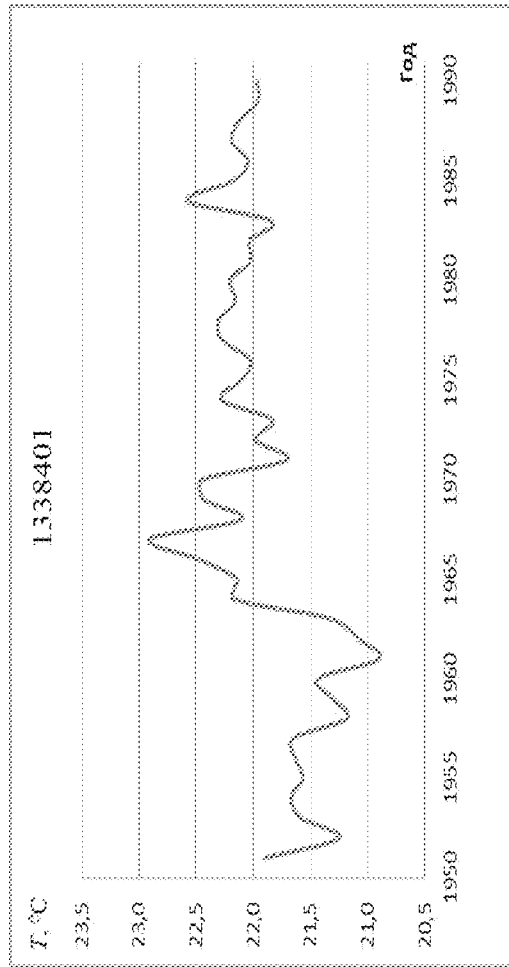
a_2'



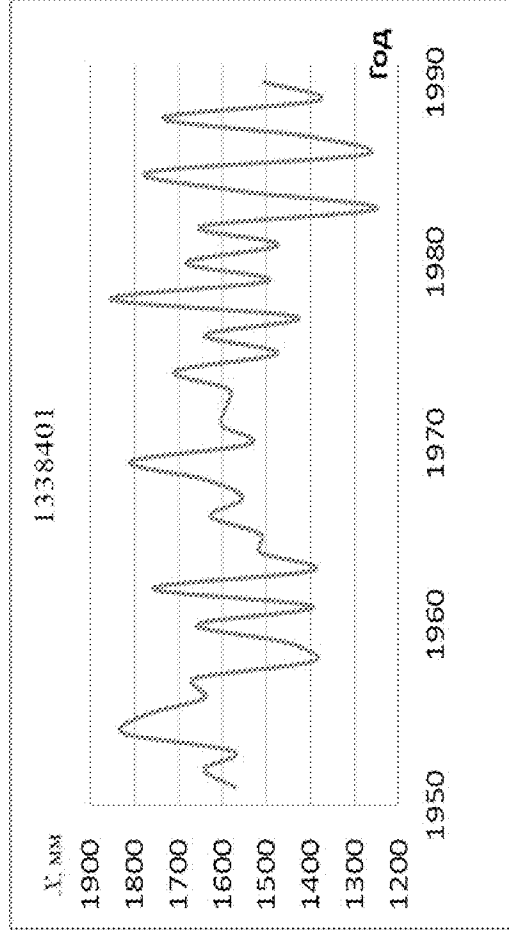
a_2''



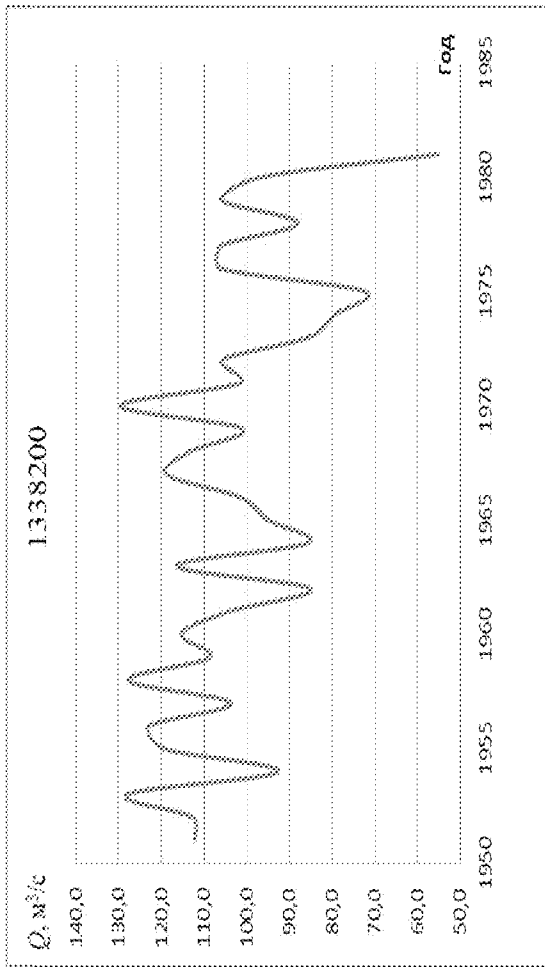
a_2'''



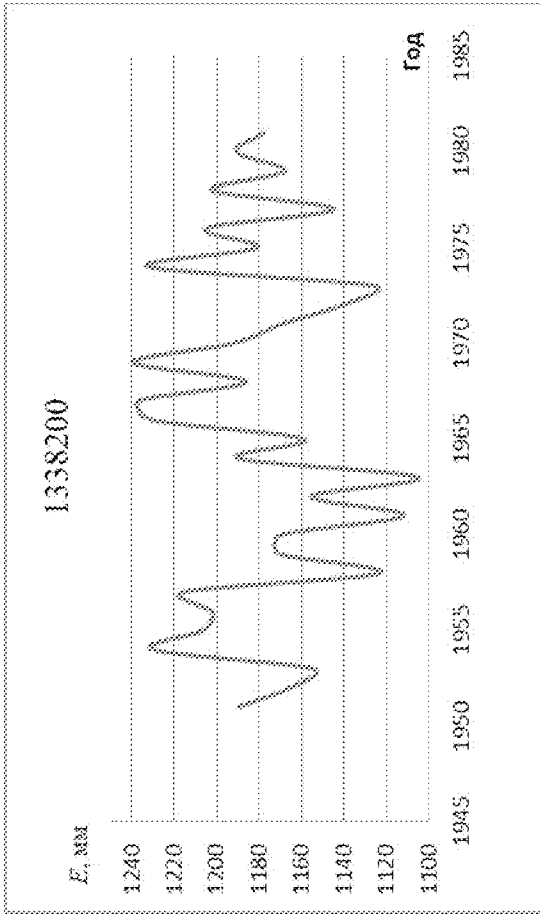
a_2''''



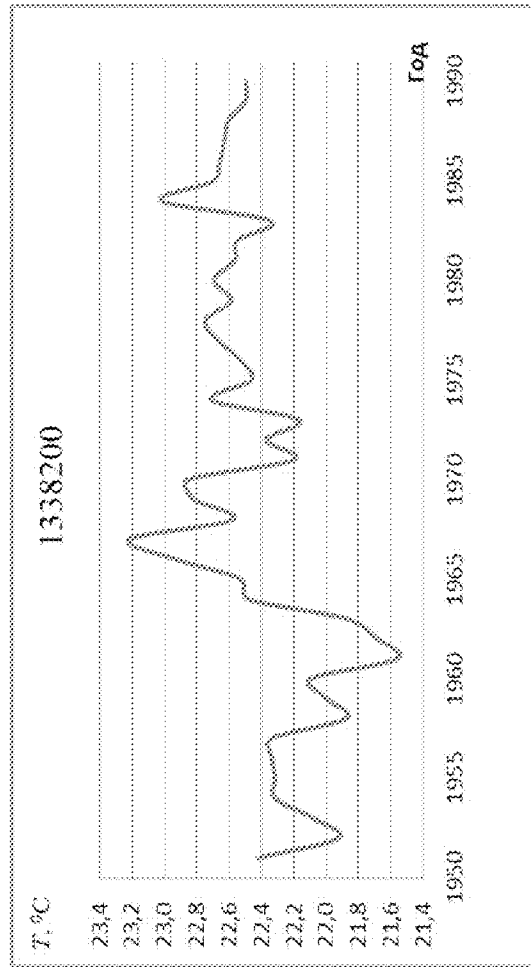
аd)



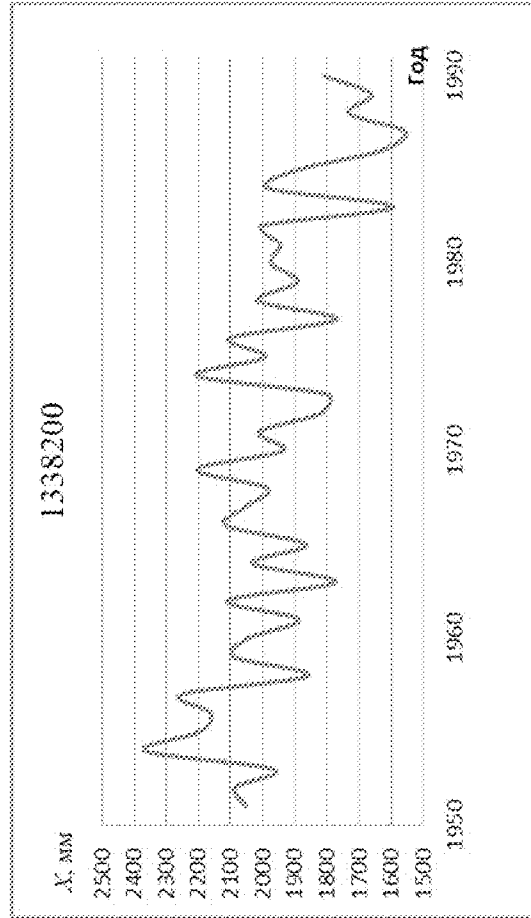
аd')



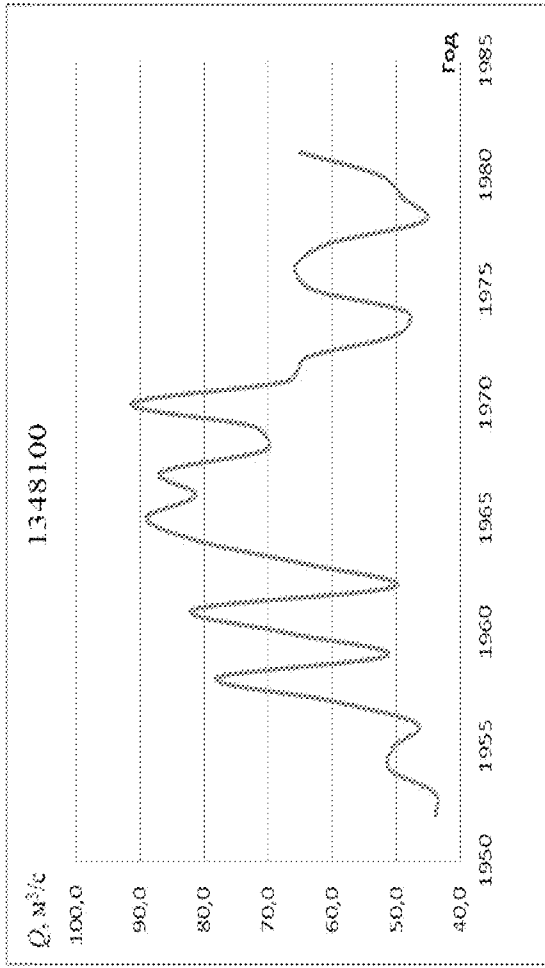
аd'')



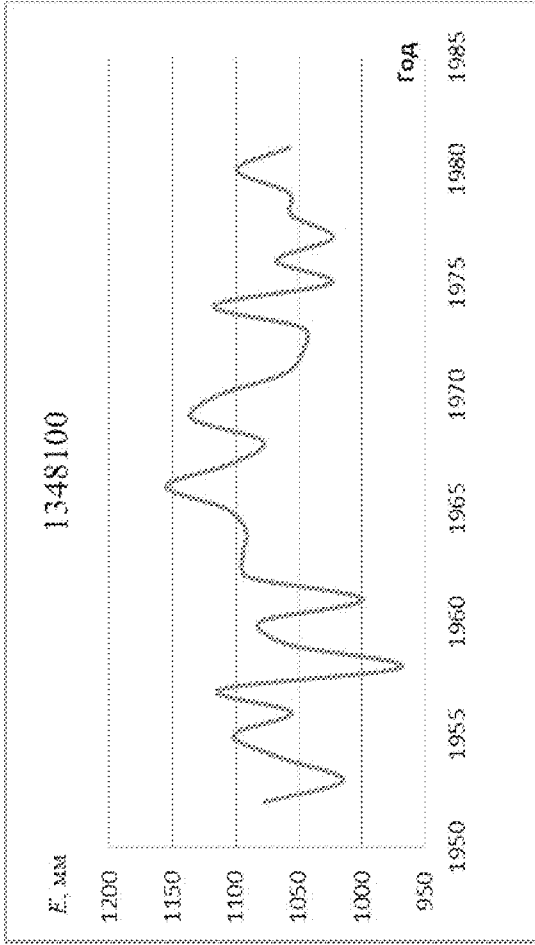
аd''')



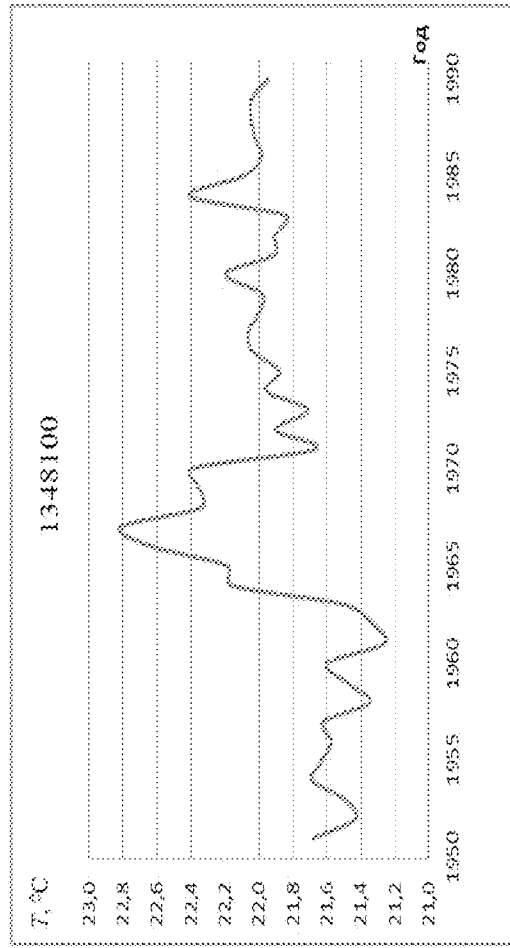
ae')



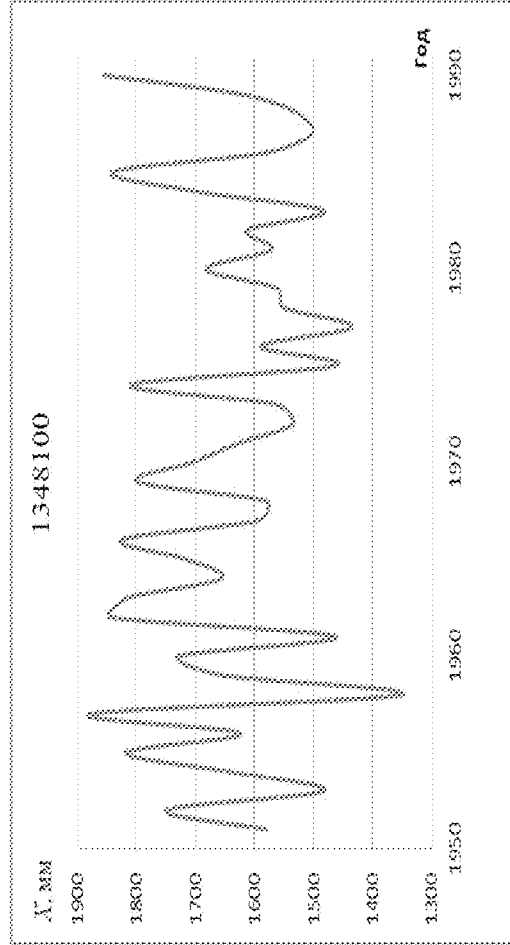
ae)



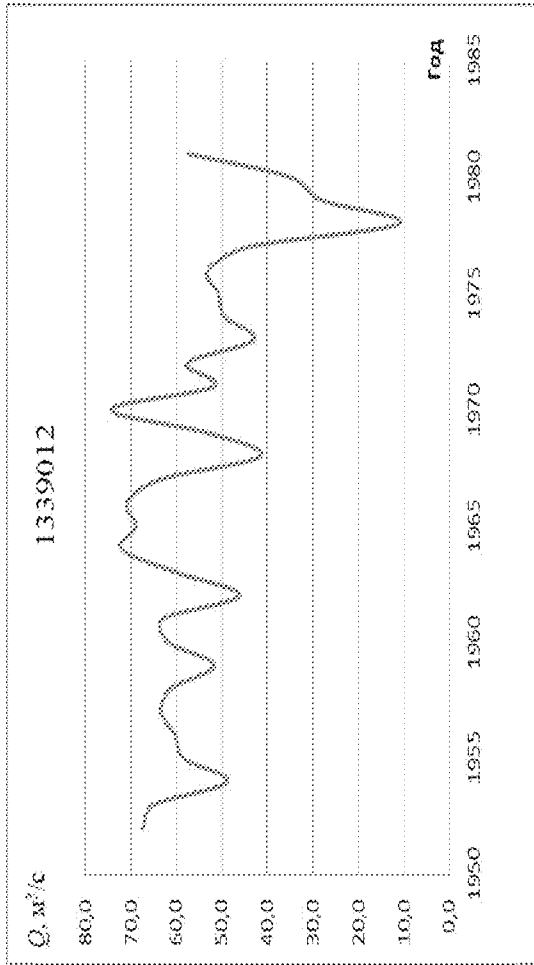
ae'')



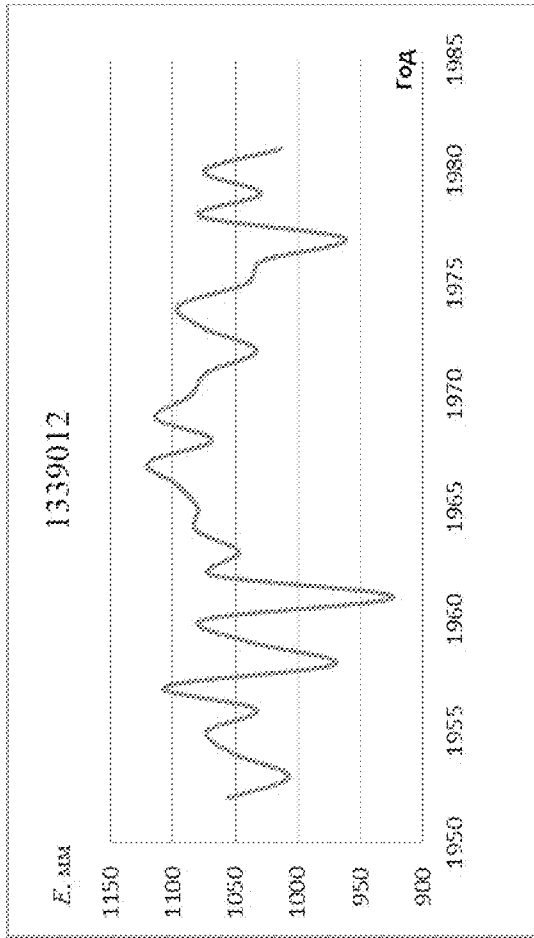
ae'')



ADJC'



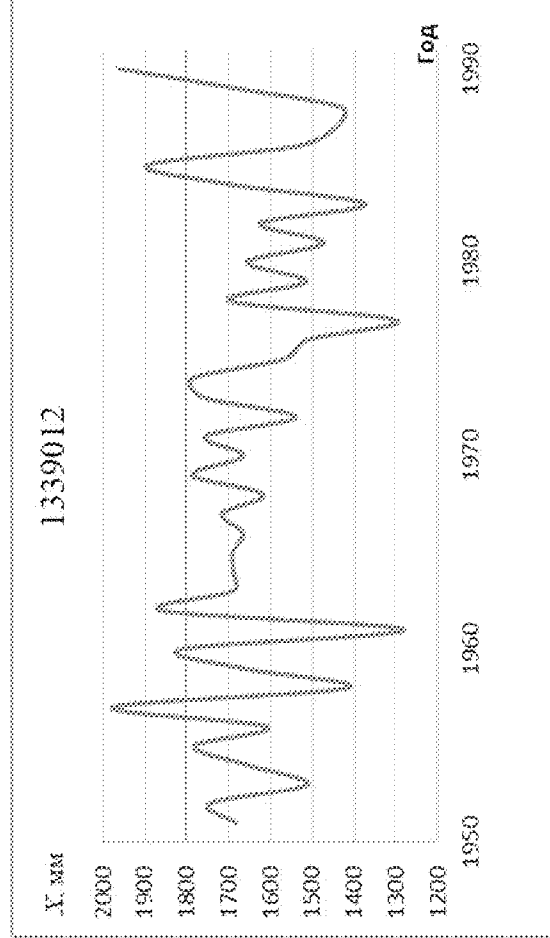
ADJC''



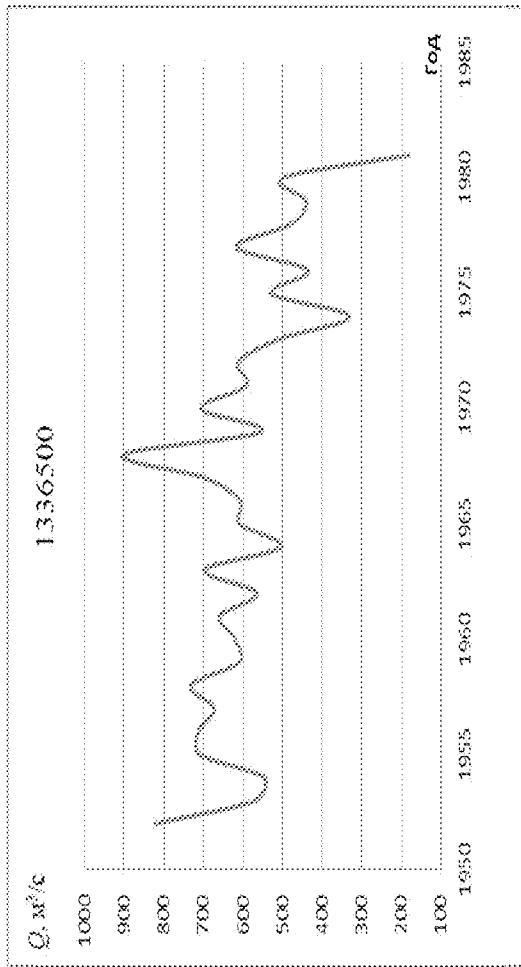
ADJC'''



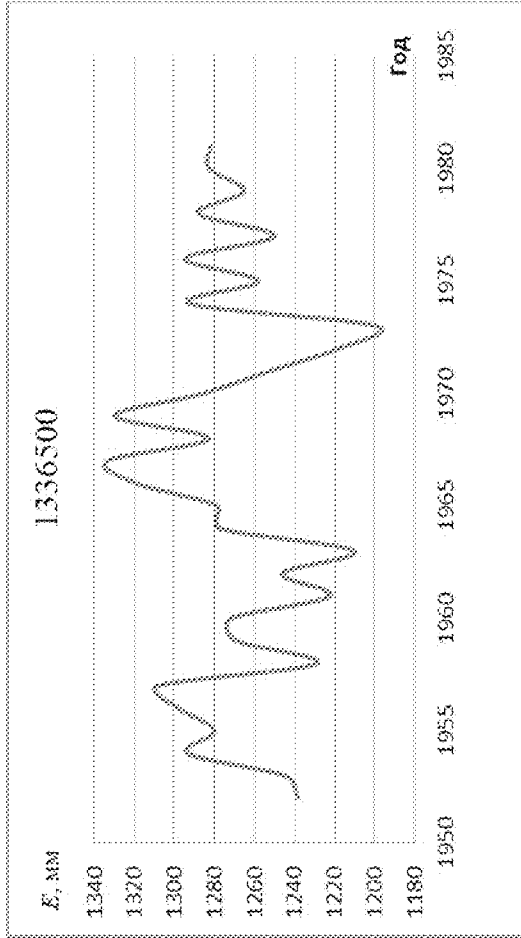
ADJC''''



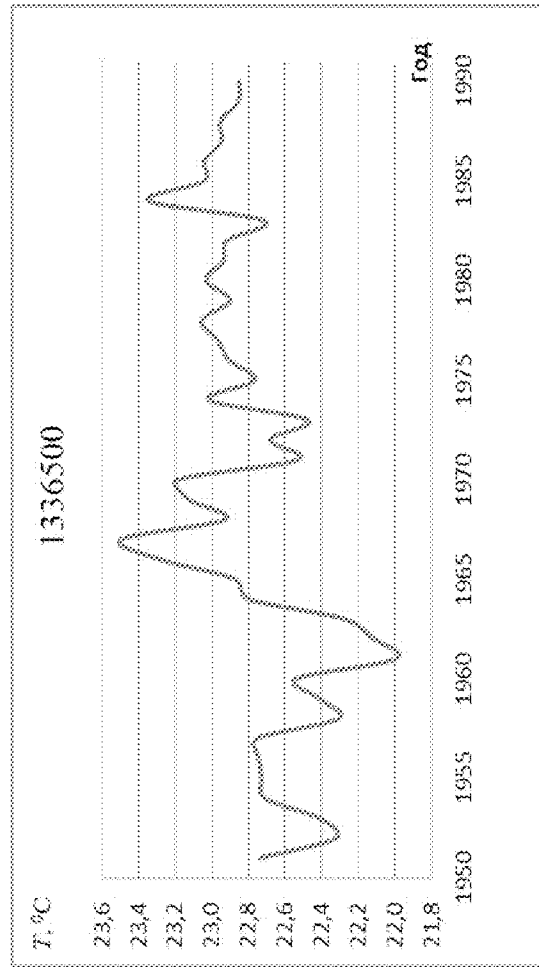
au)



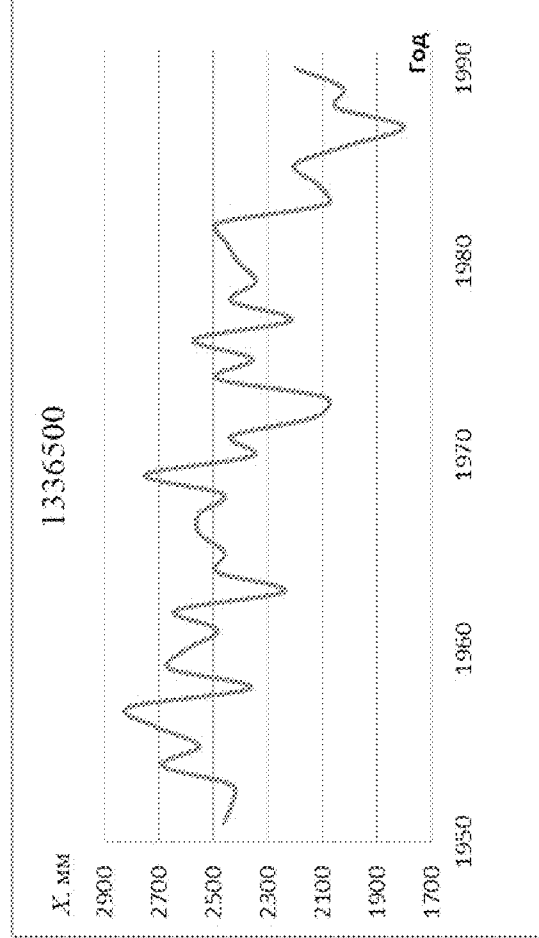
au)



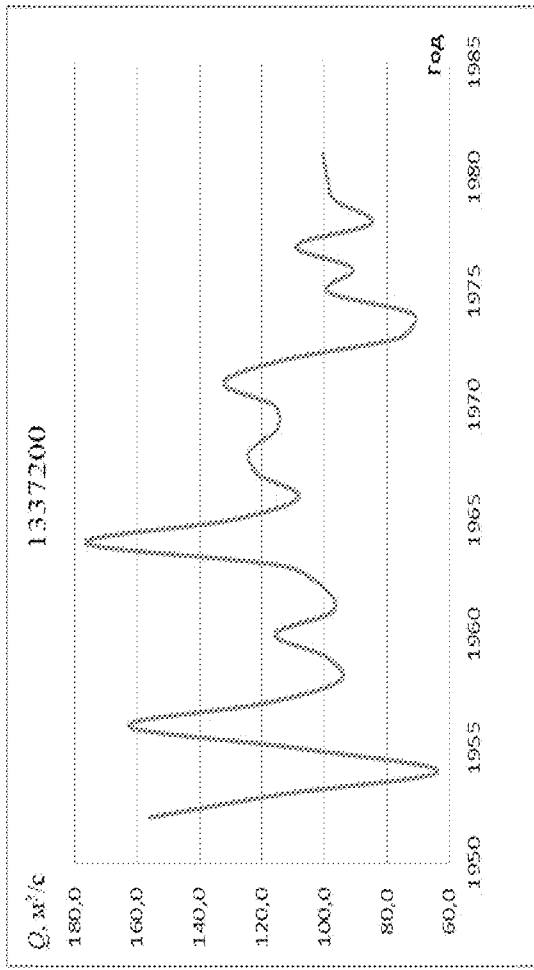
au)



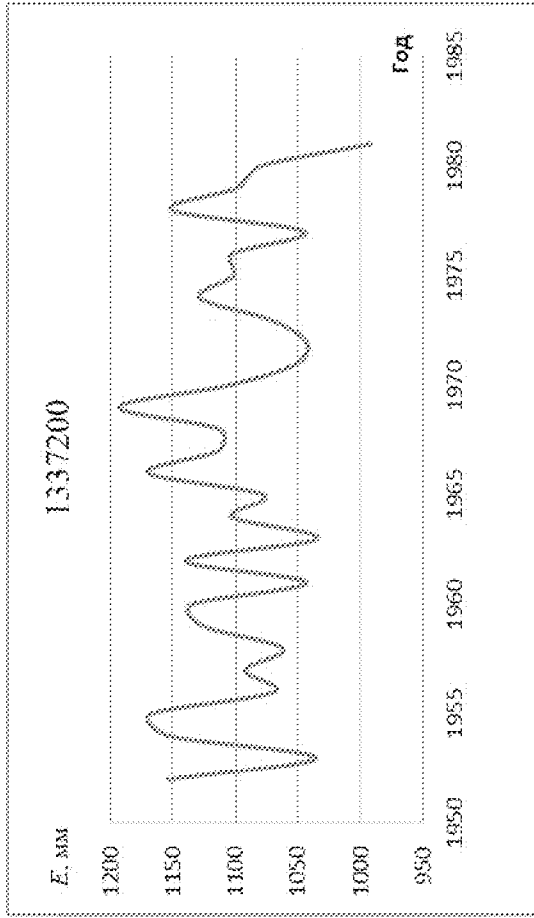
au)



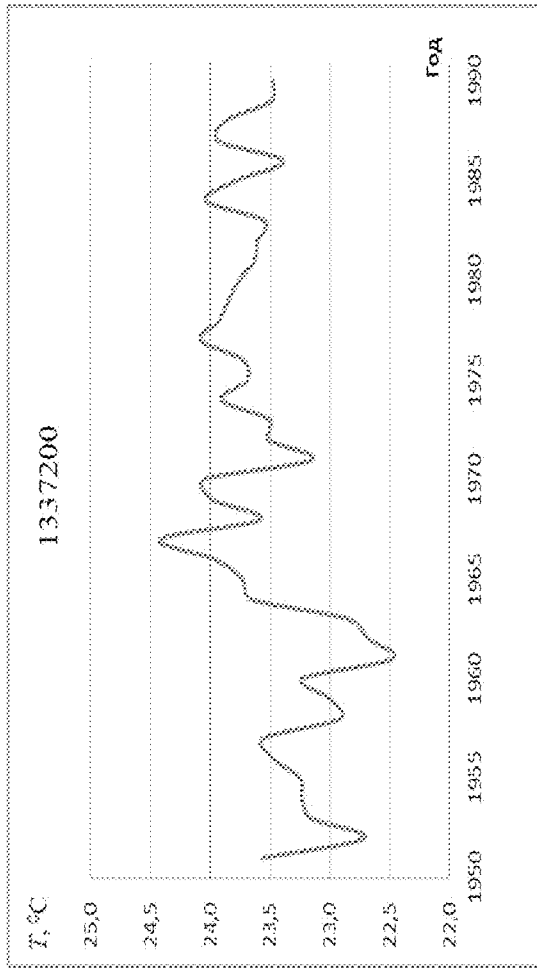
аК)



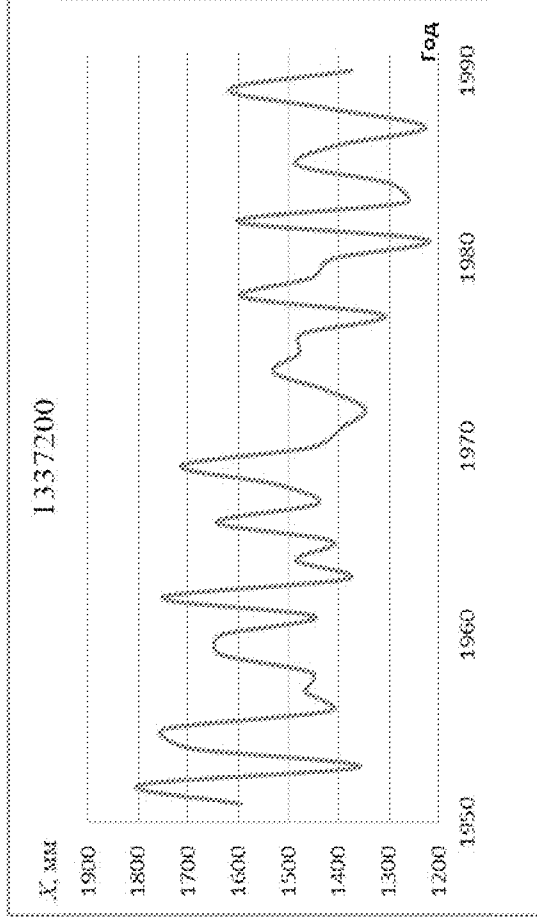
аК')



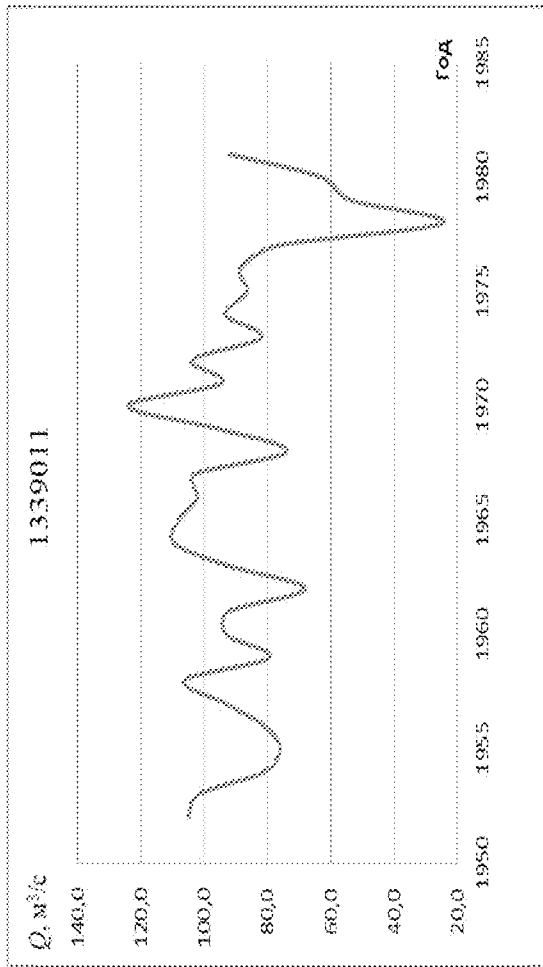
аК'')



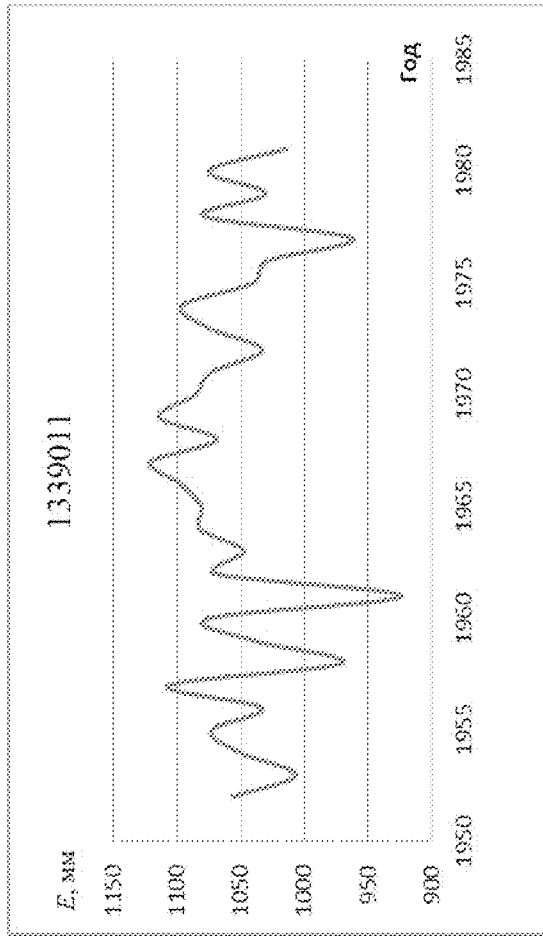
аК''')



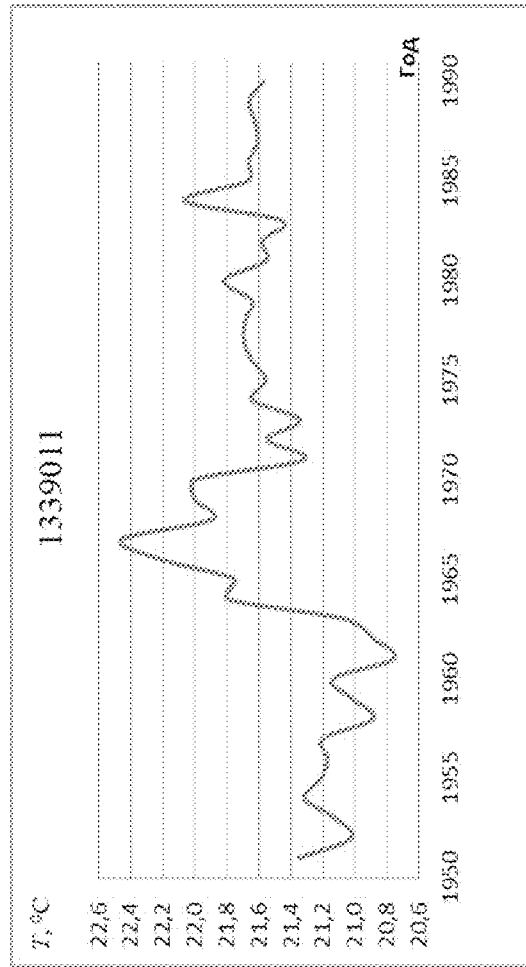
аII)



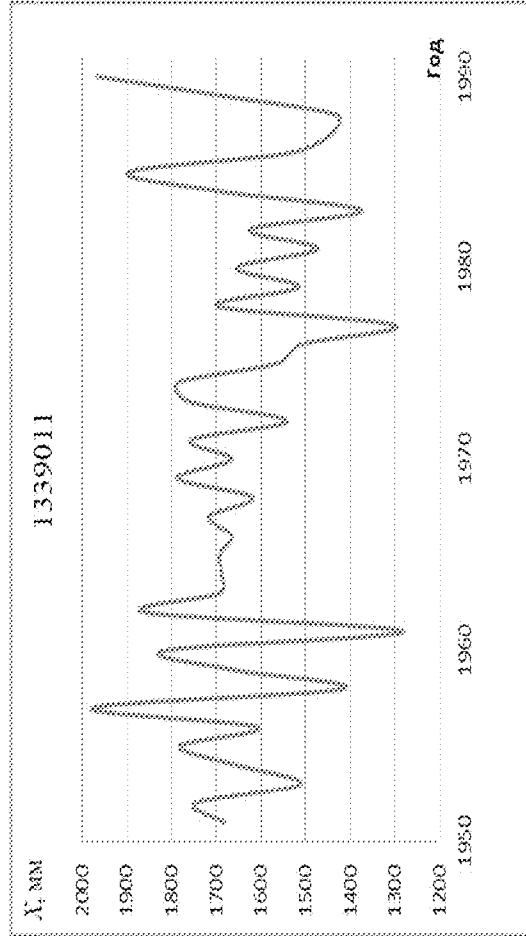
аII')



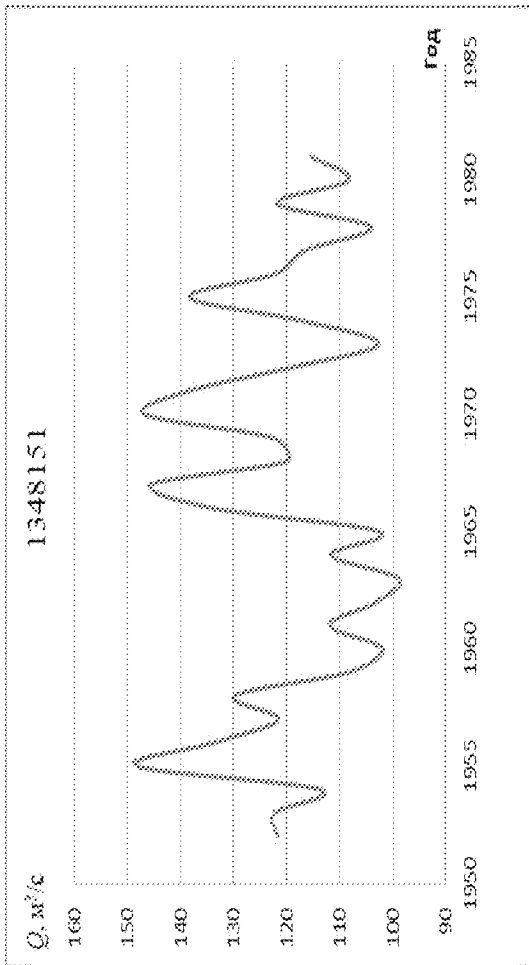
аII''')



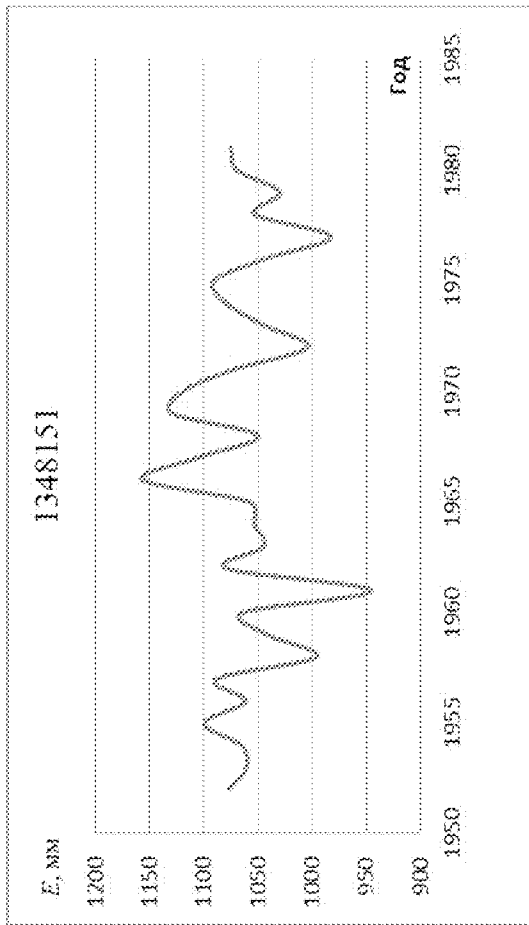
аII''')



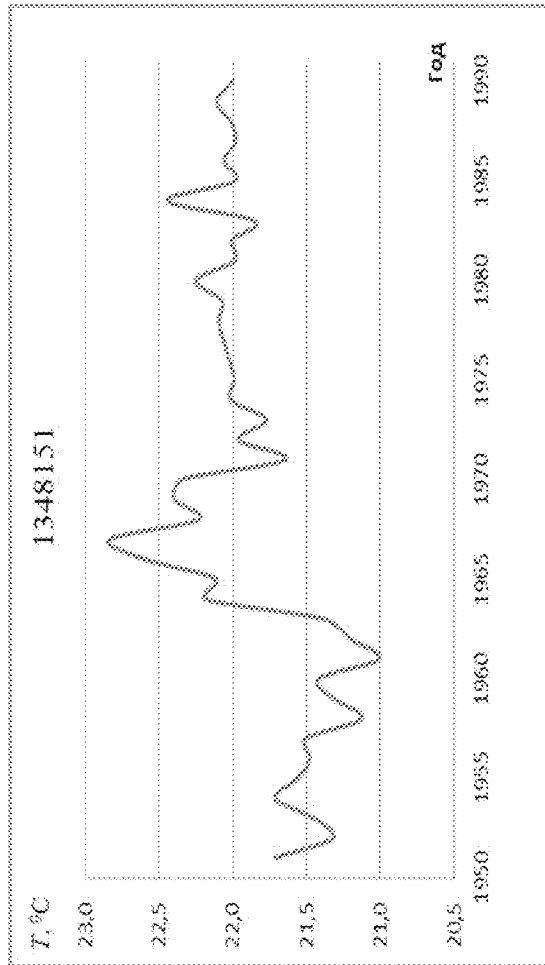
AM)



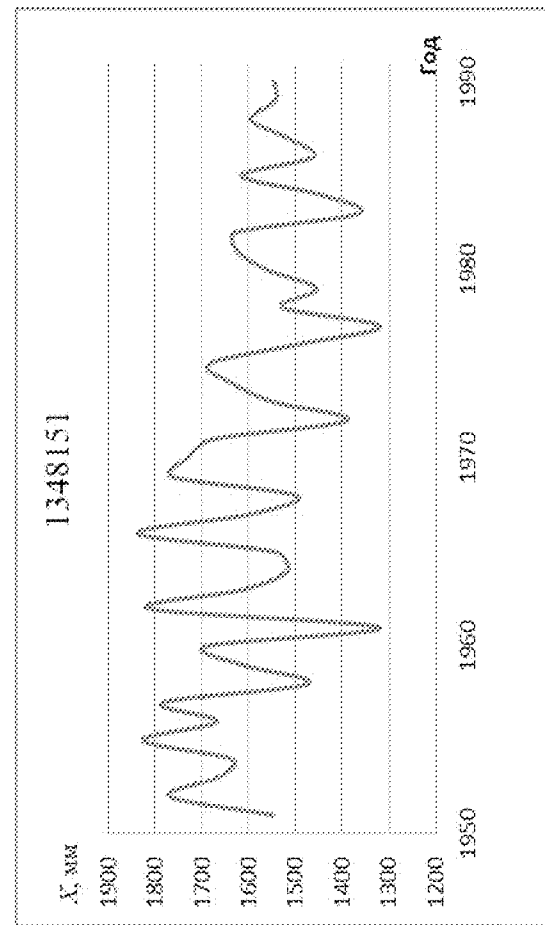
AM)



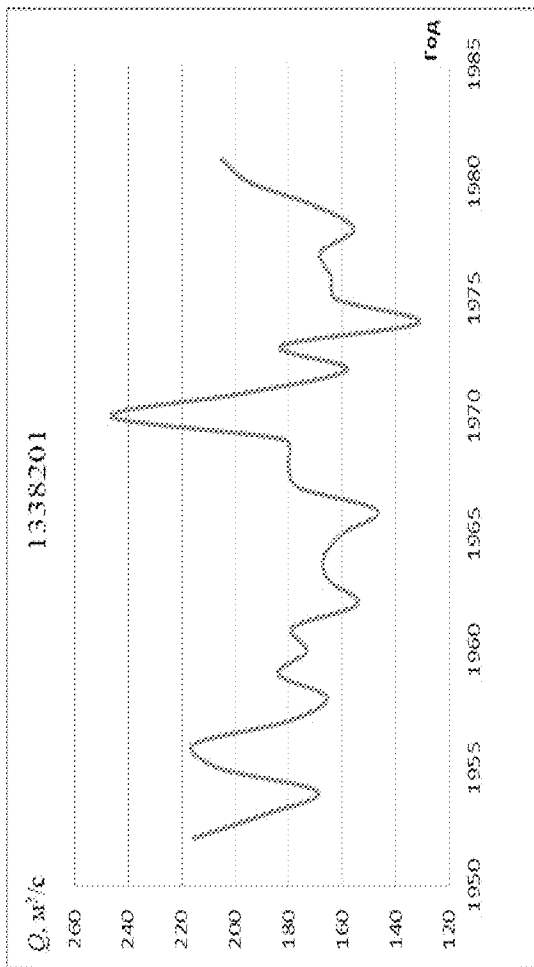
AM)



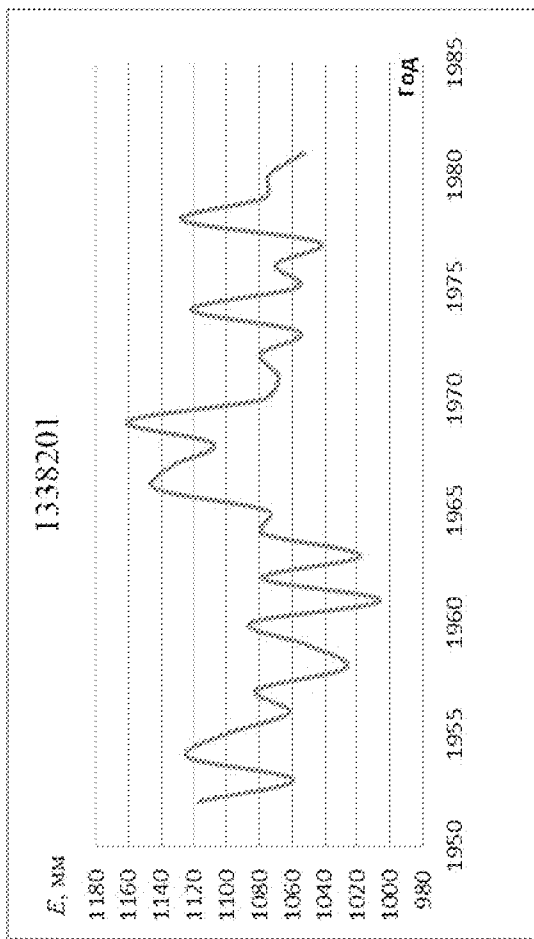
AM)



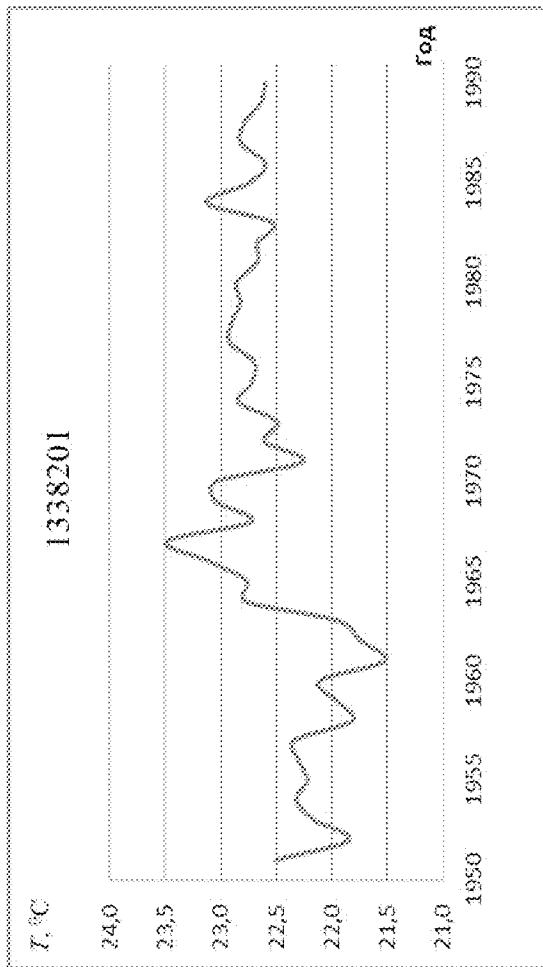
аИ)



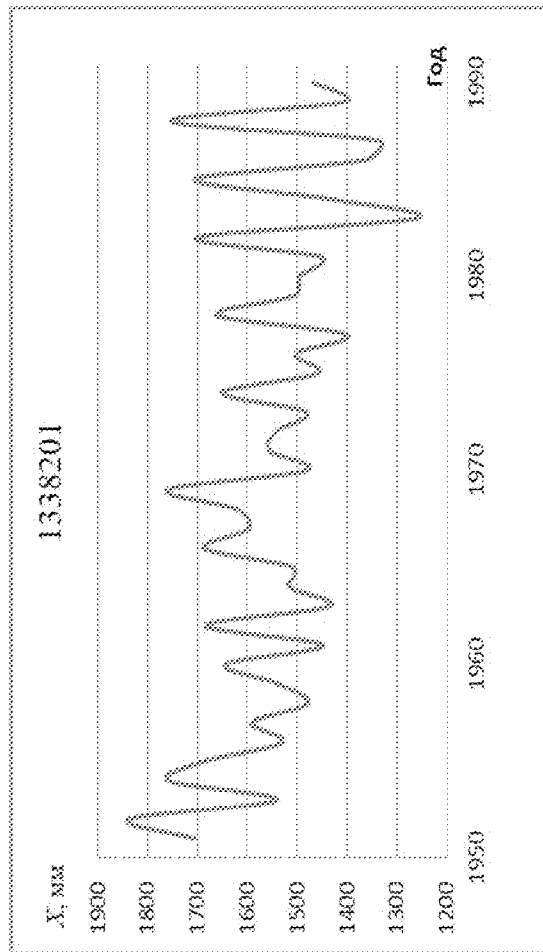
аИ')



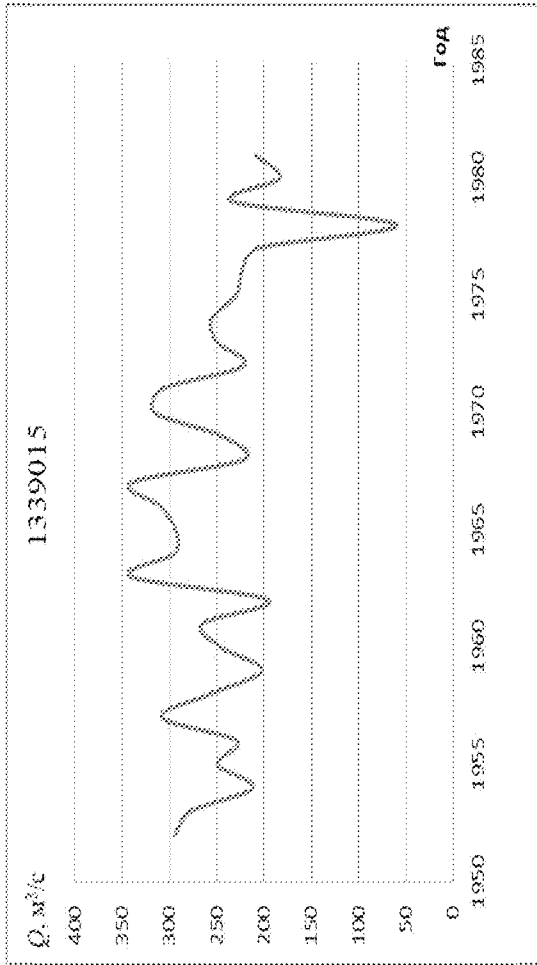
аИ'')



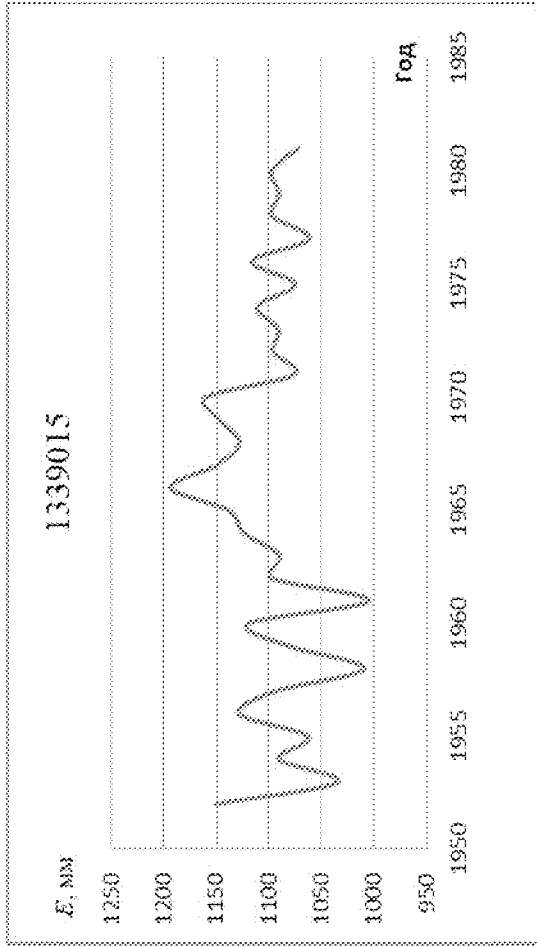
аИ''')



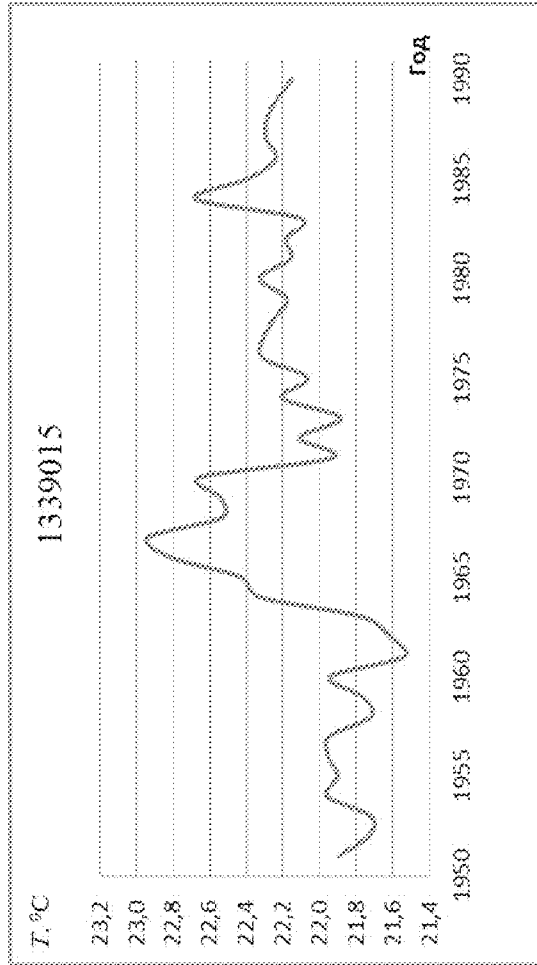
ao)



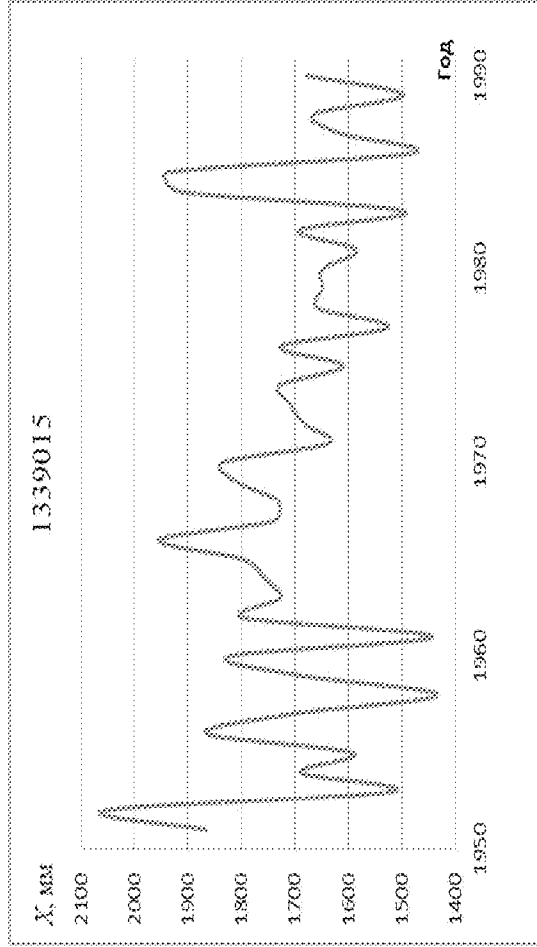
ao')



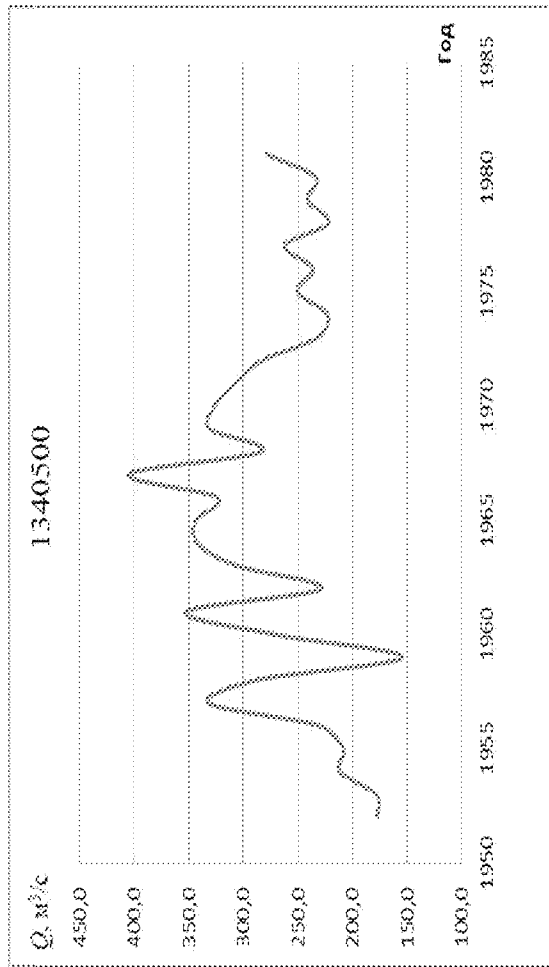
ao'')



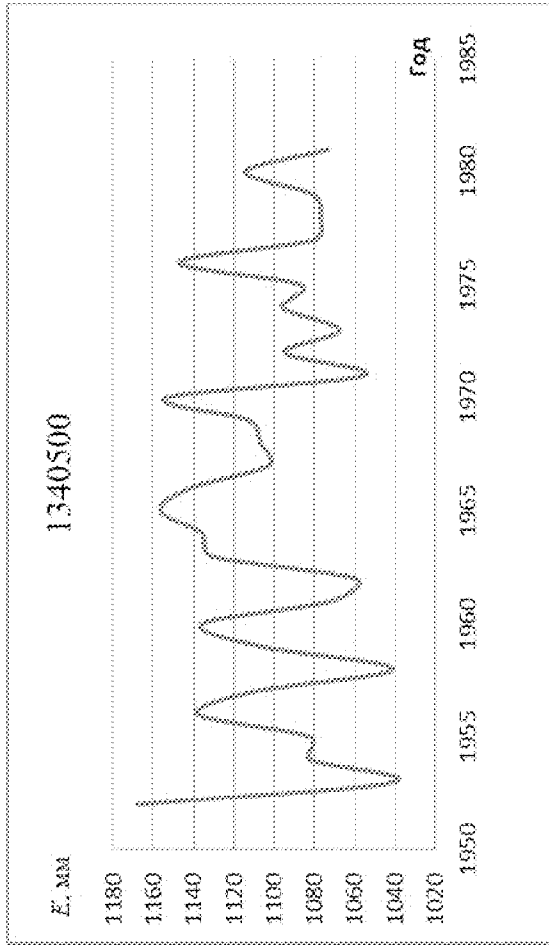
ao''')



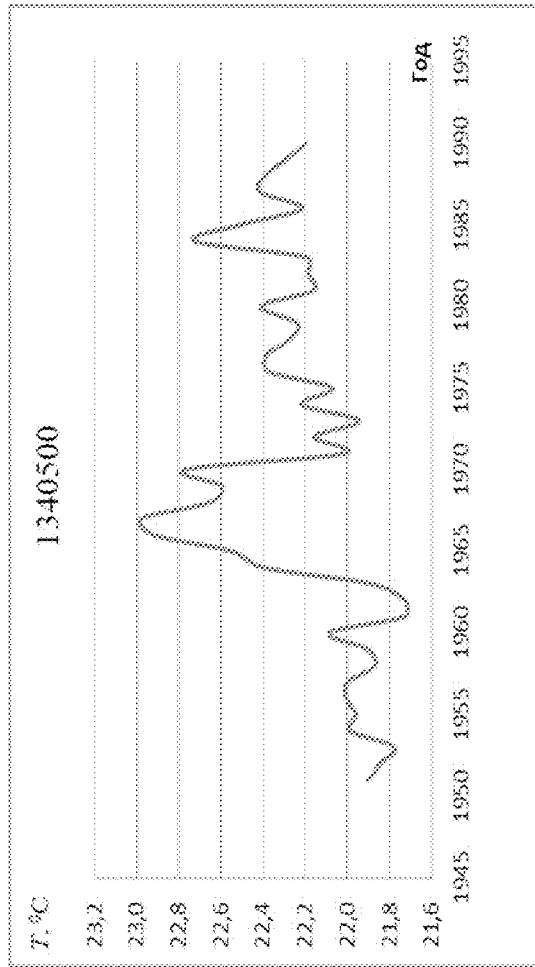
an)



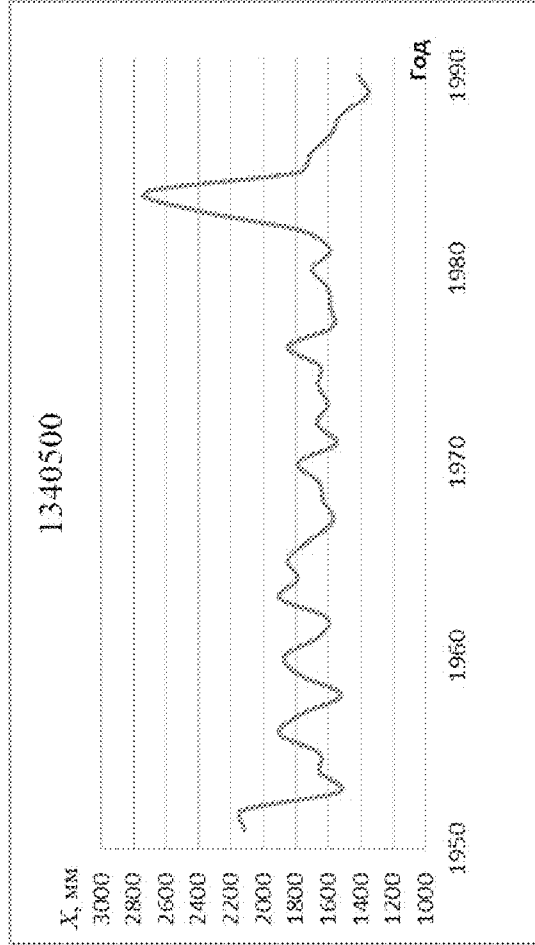
an')



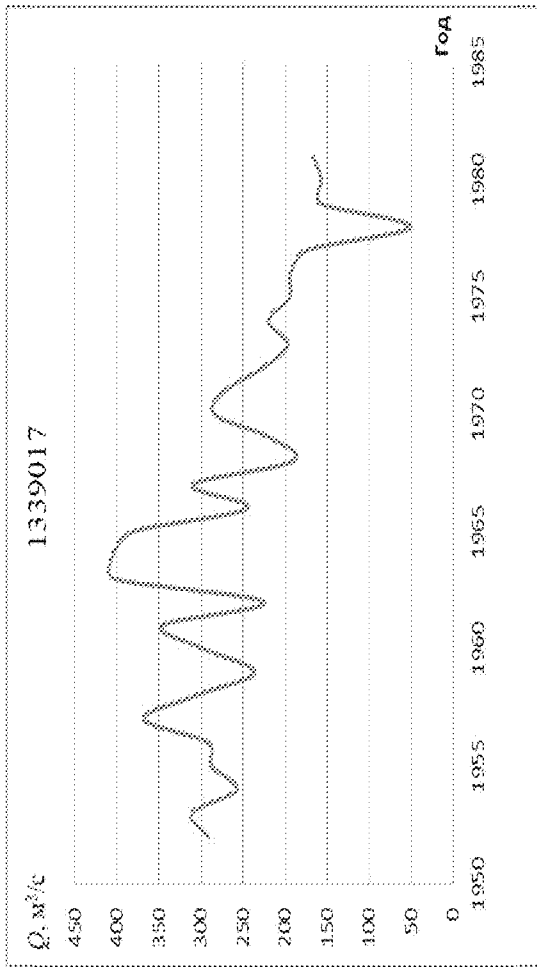
an'')



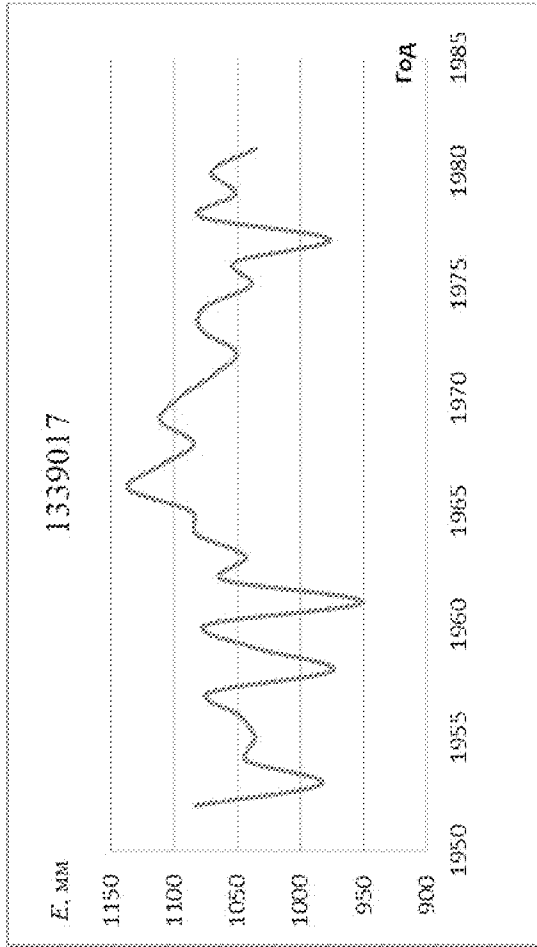
an''')



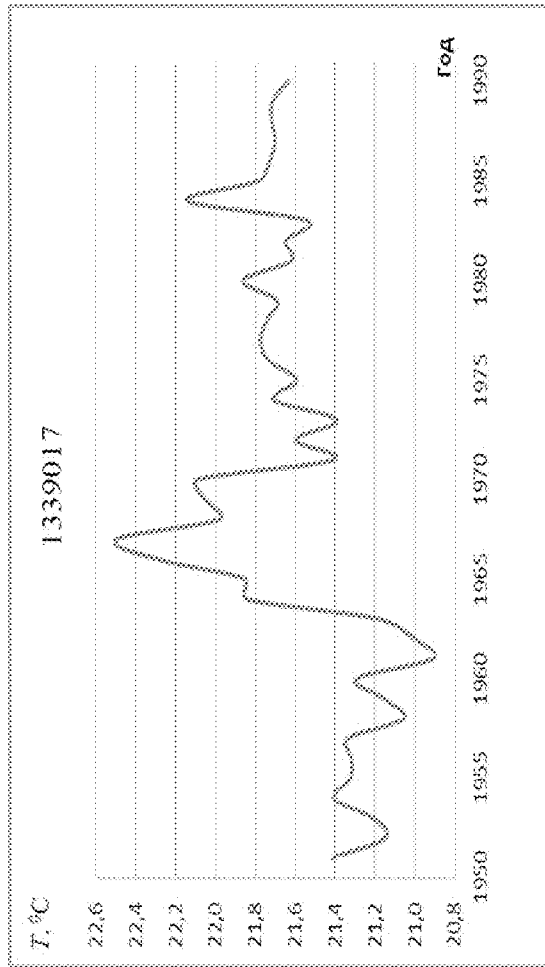
ap)



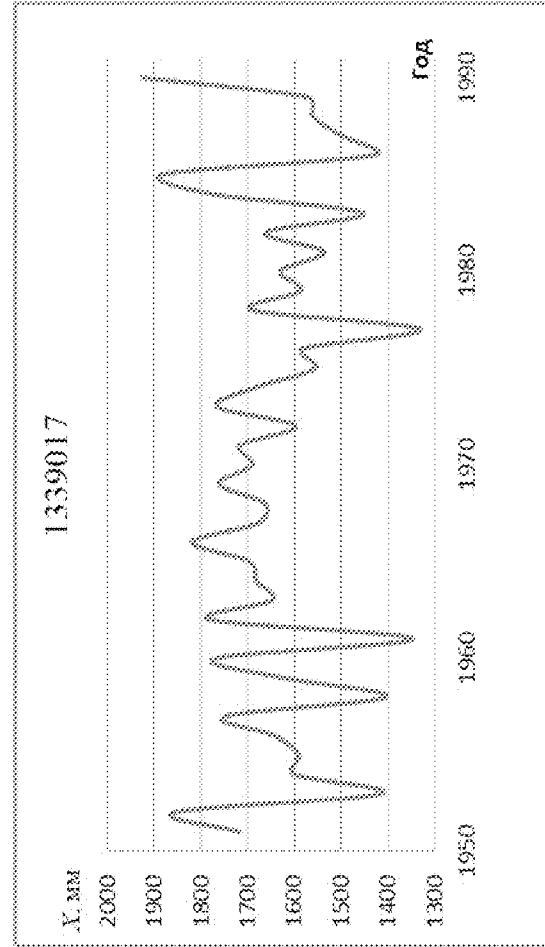
ap)



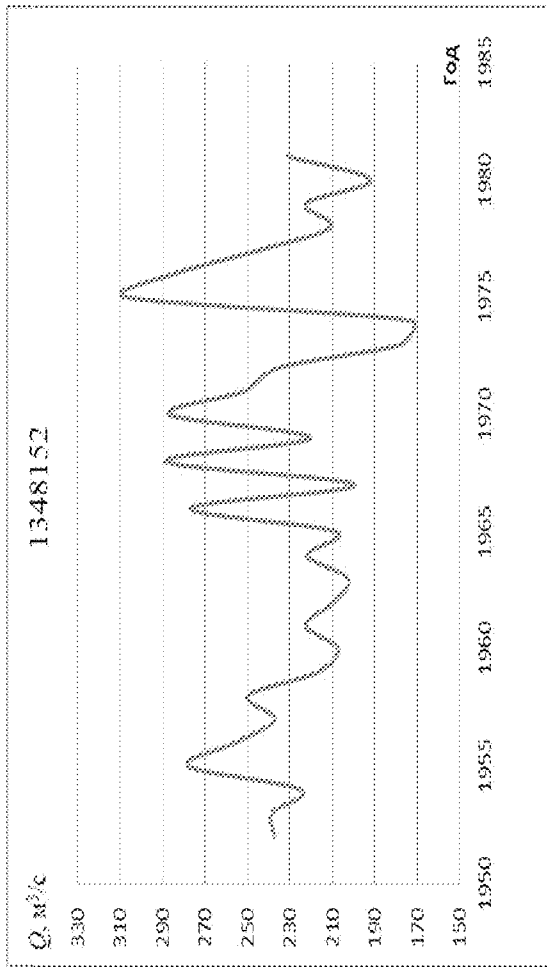
ap''')



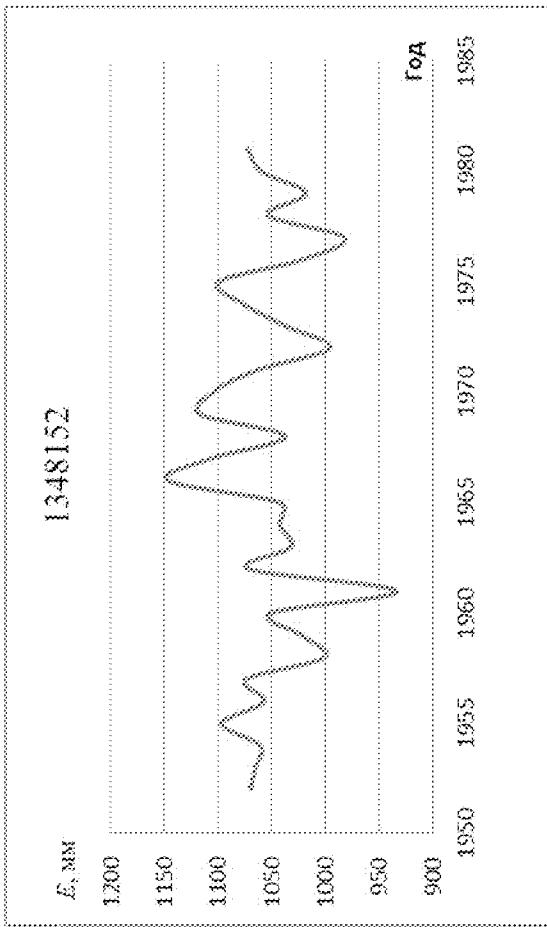
ap''')



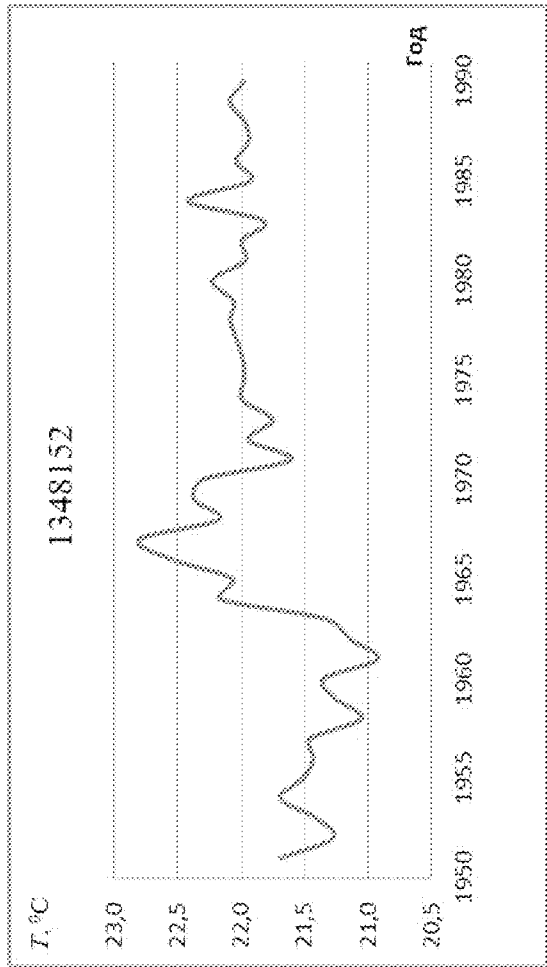
ac)



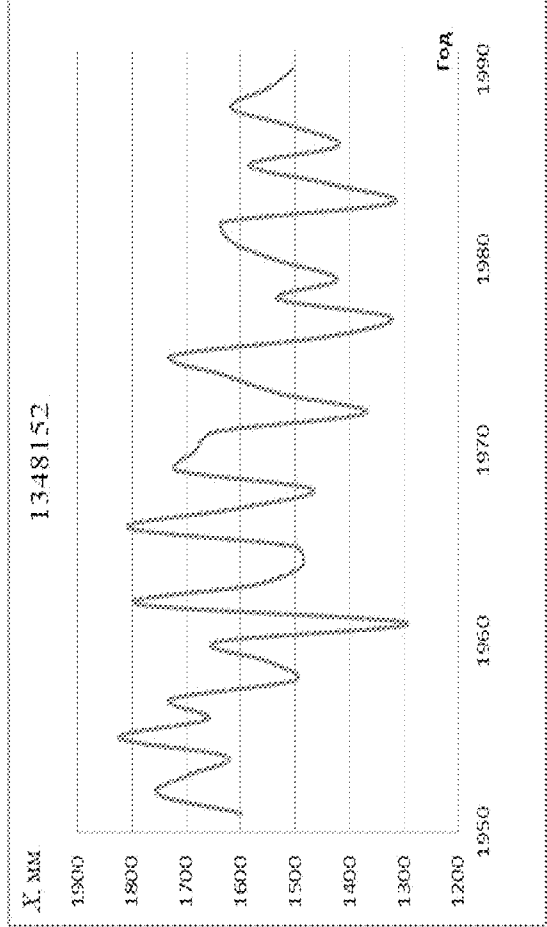
ac')



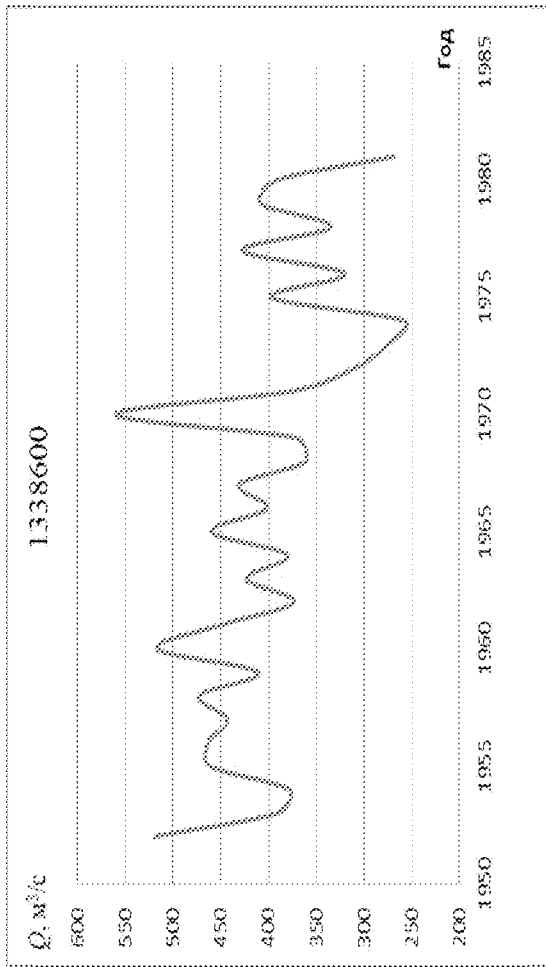
ac'')



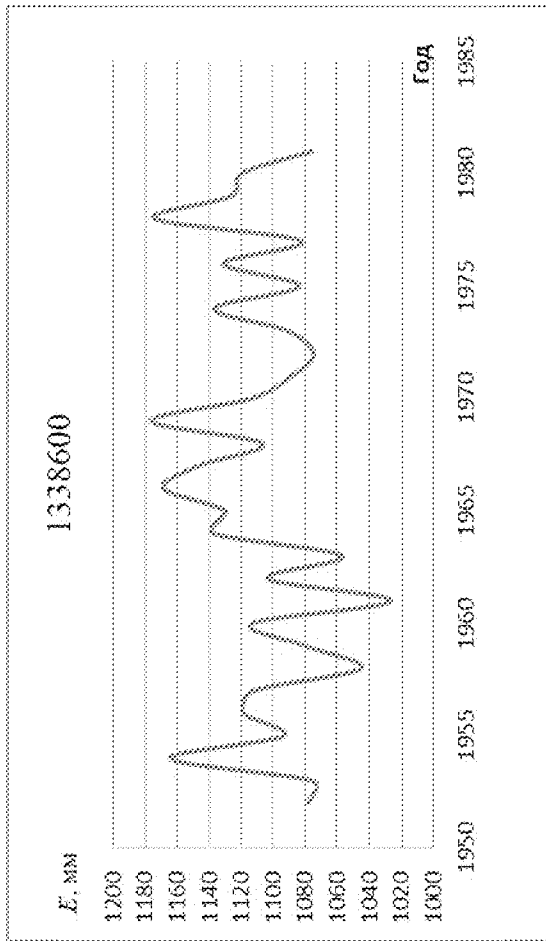
ac''')



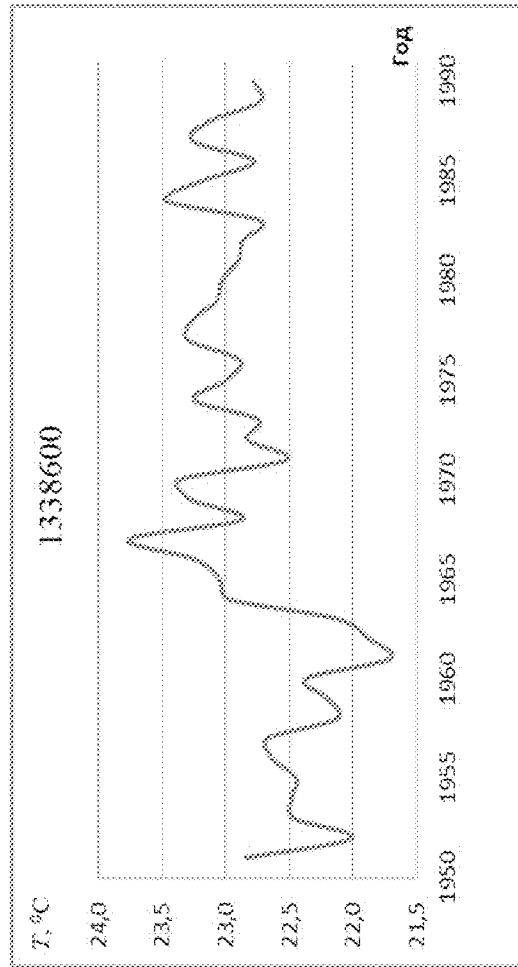
am)



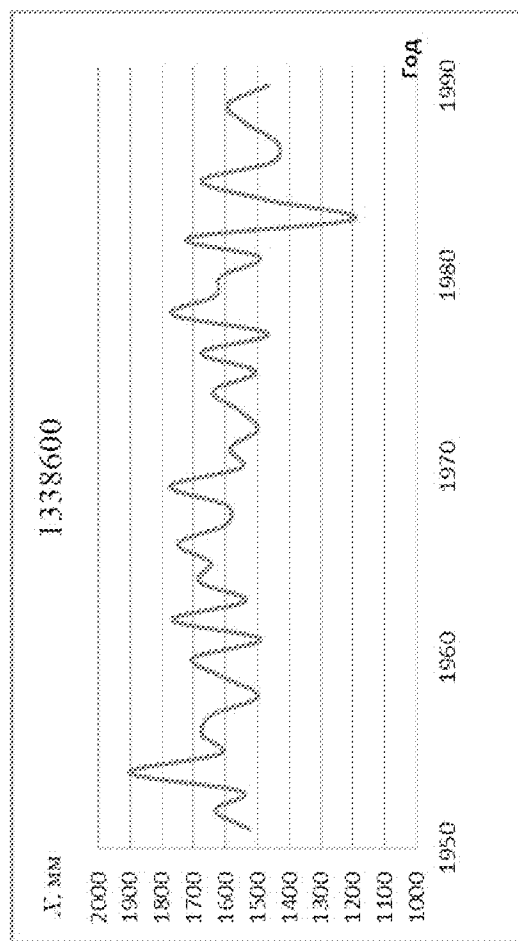
am')



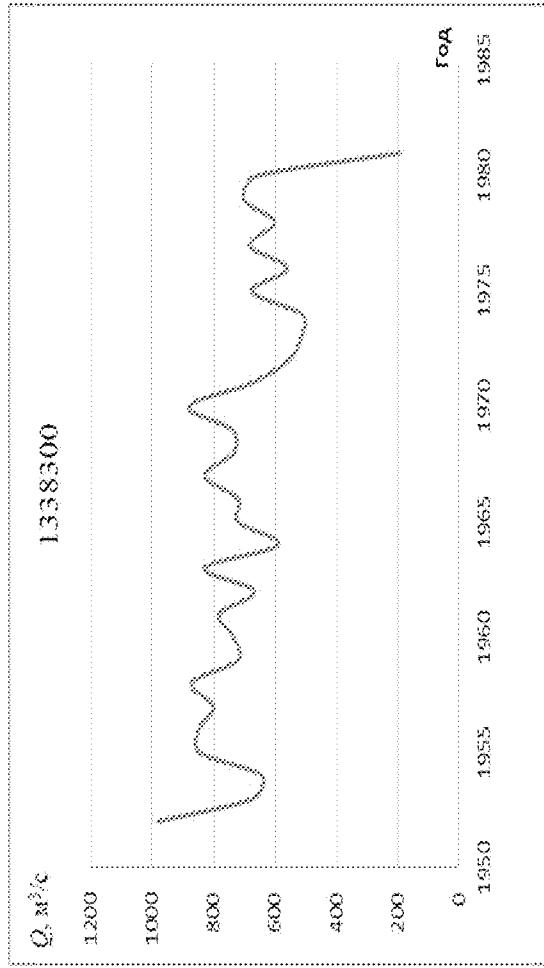
am'')



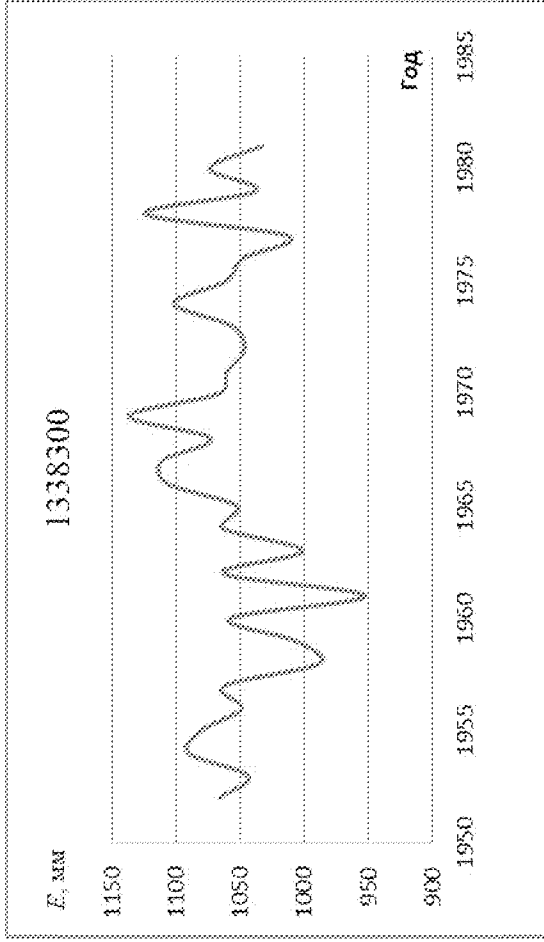
am''')



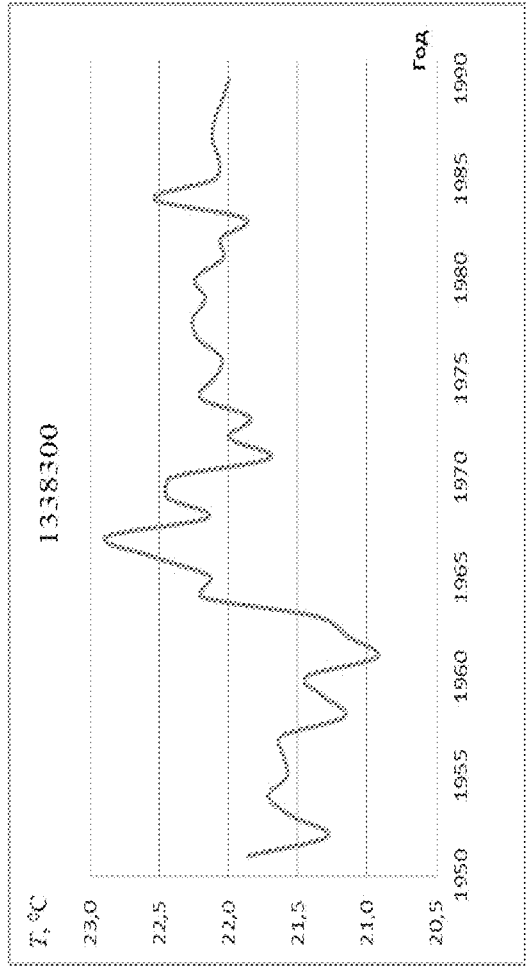
$\alpha\gamma'$



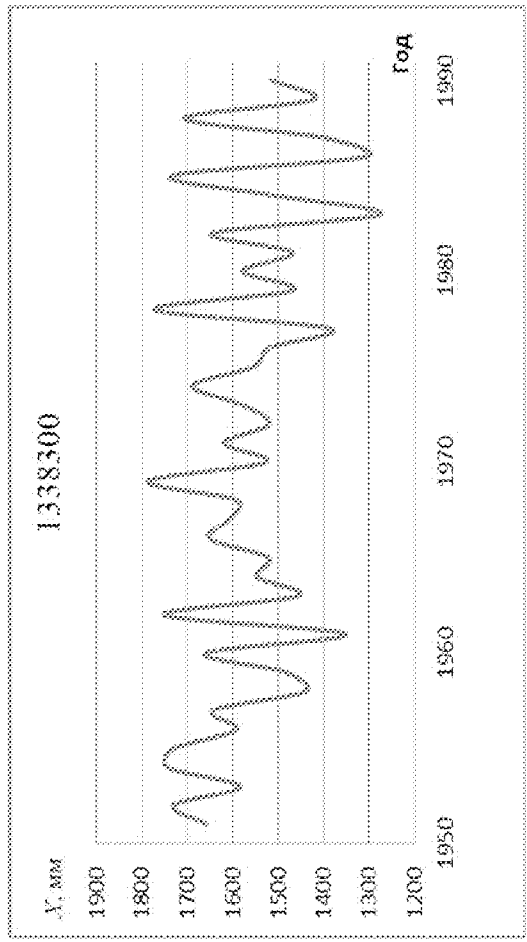
$\alpha\gamma''$



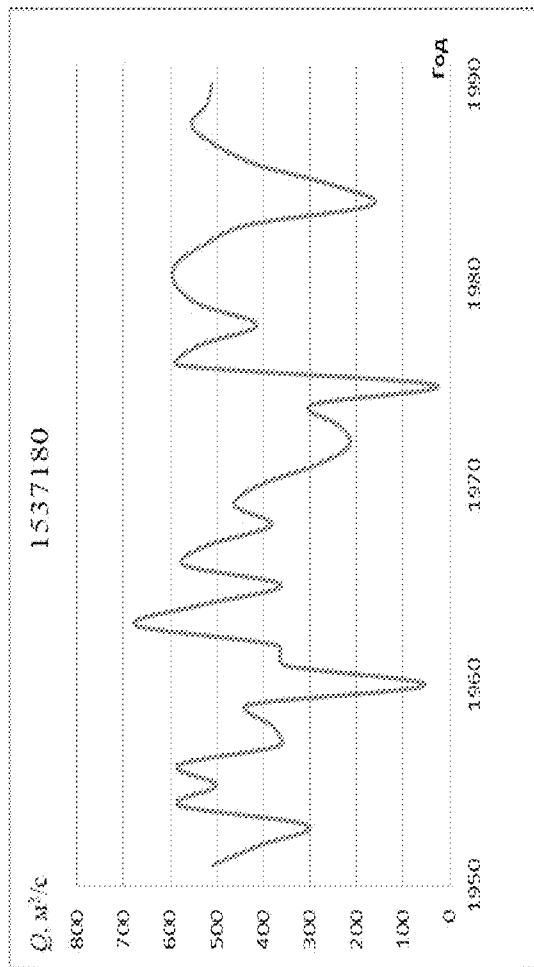
$\alpha\gamma'''$



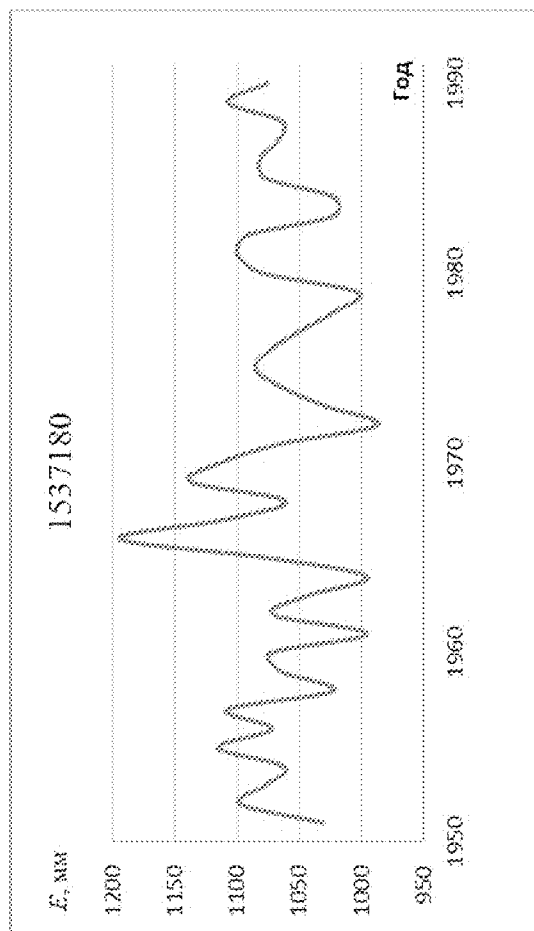
$\alpha\gamma''''$



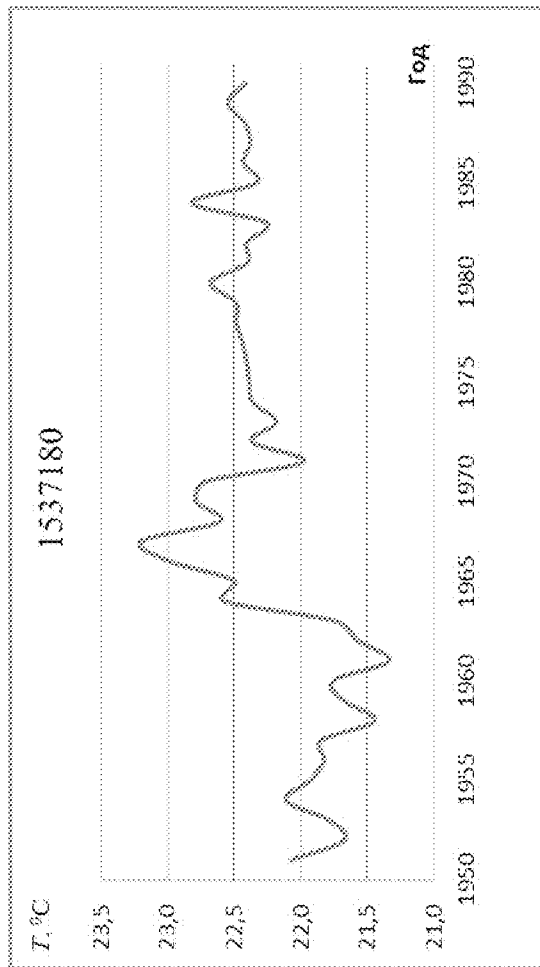
aφ)



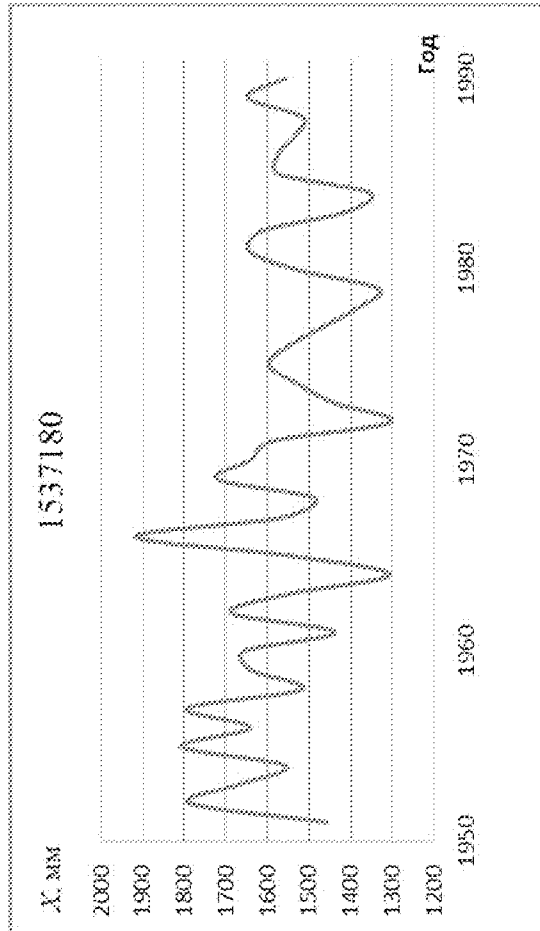
aφ')



aφ'')

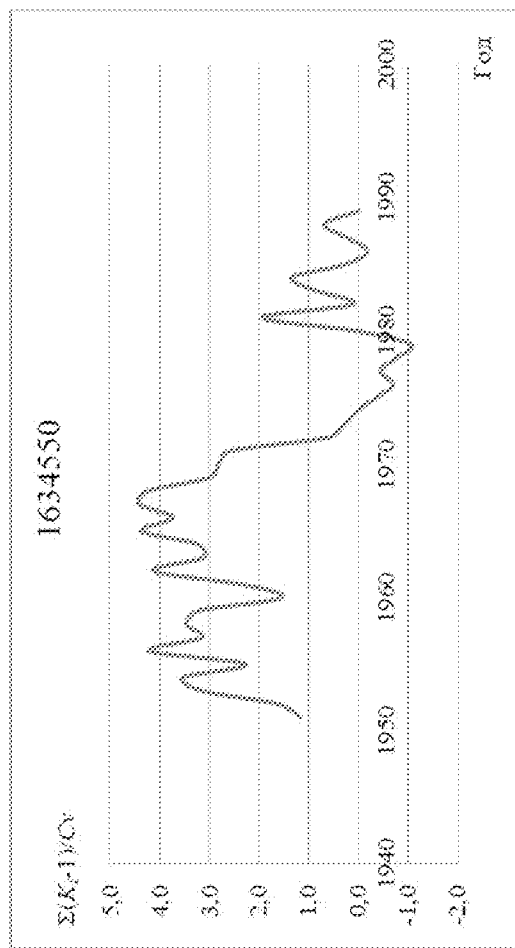
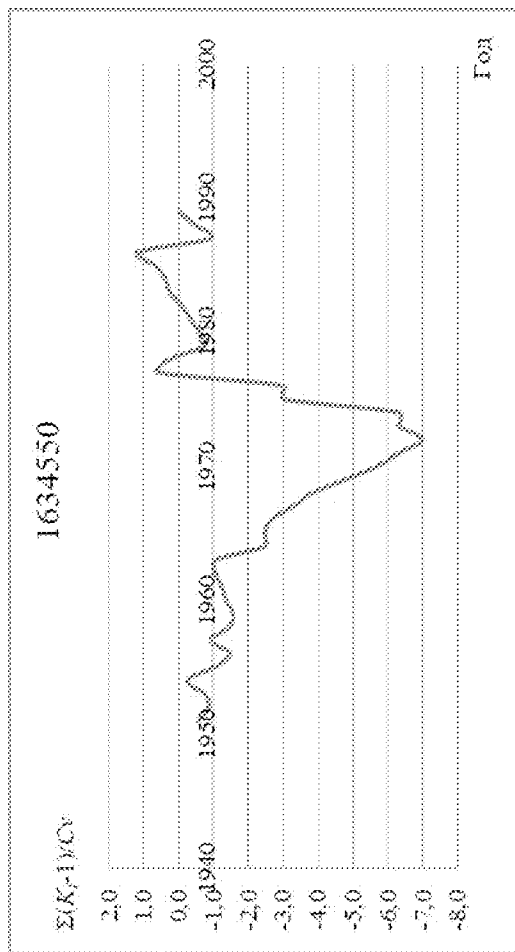


aφ''')

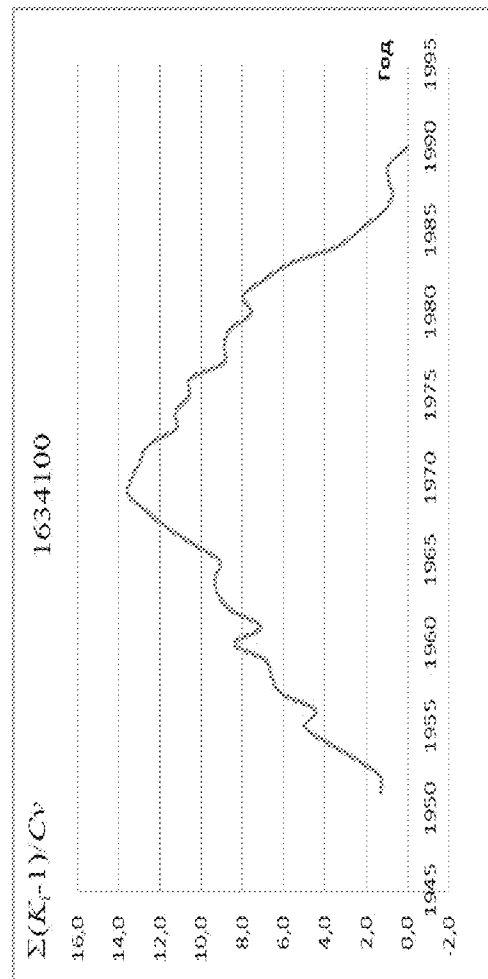
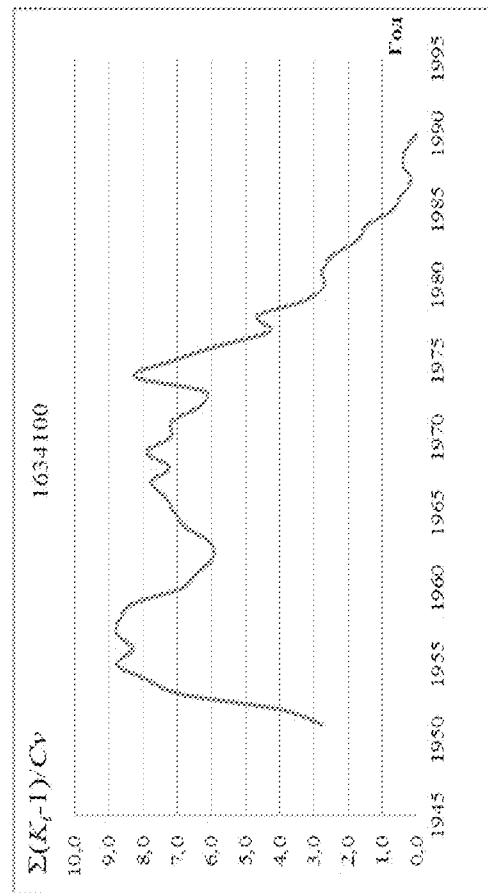


ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Разностно-интегральные кривые стока и испарения

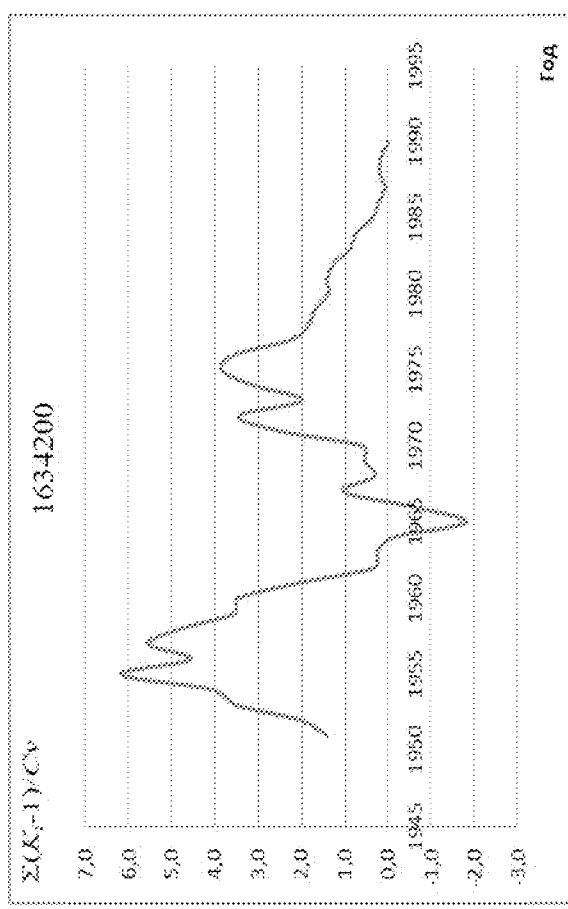
а)



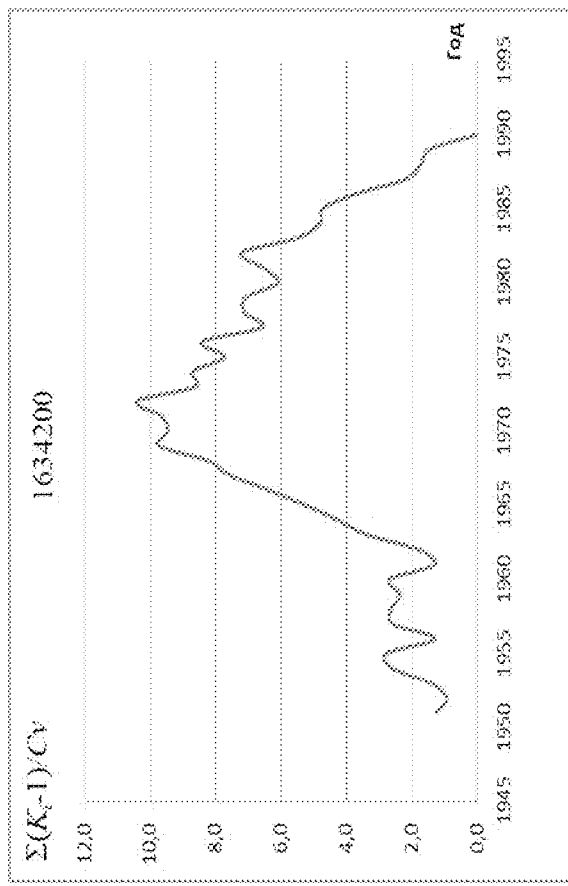
б)



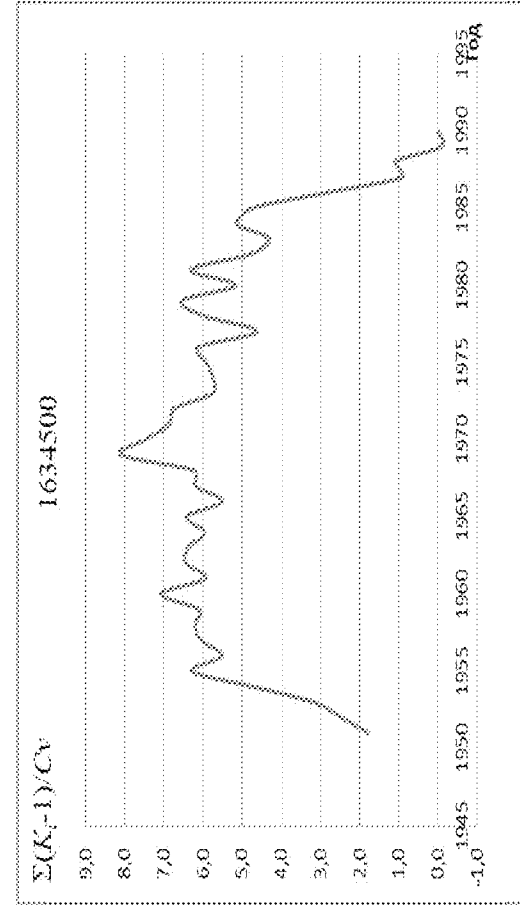
6)



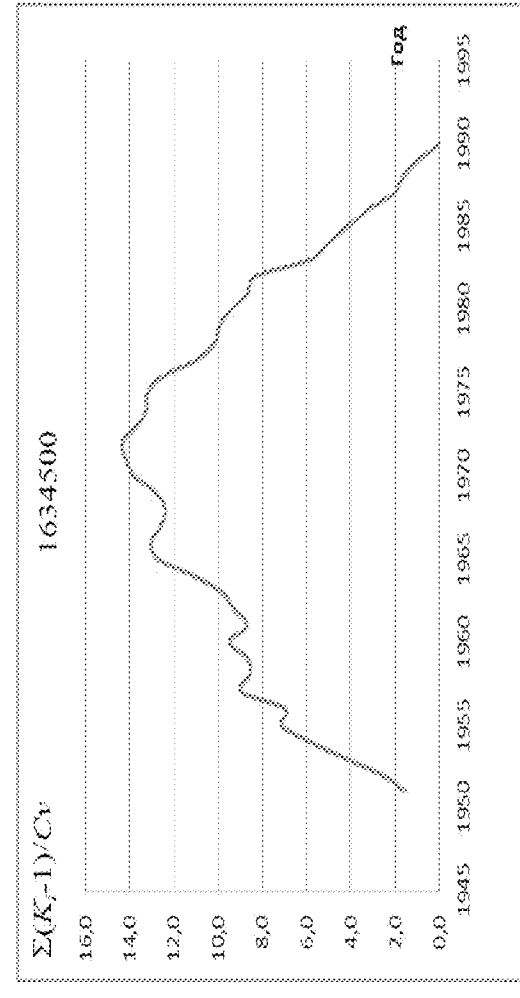
6')



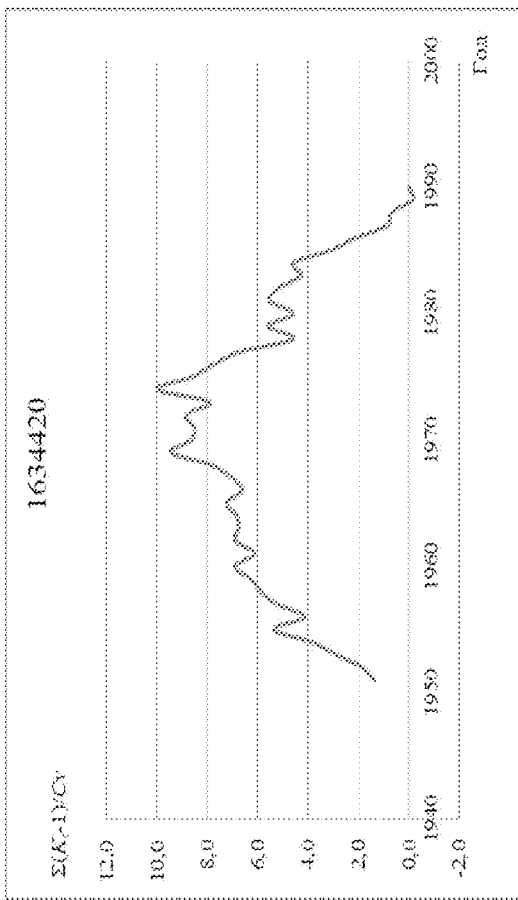
2)



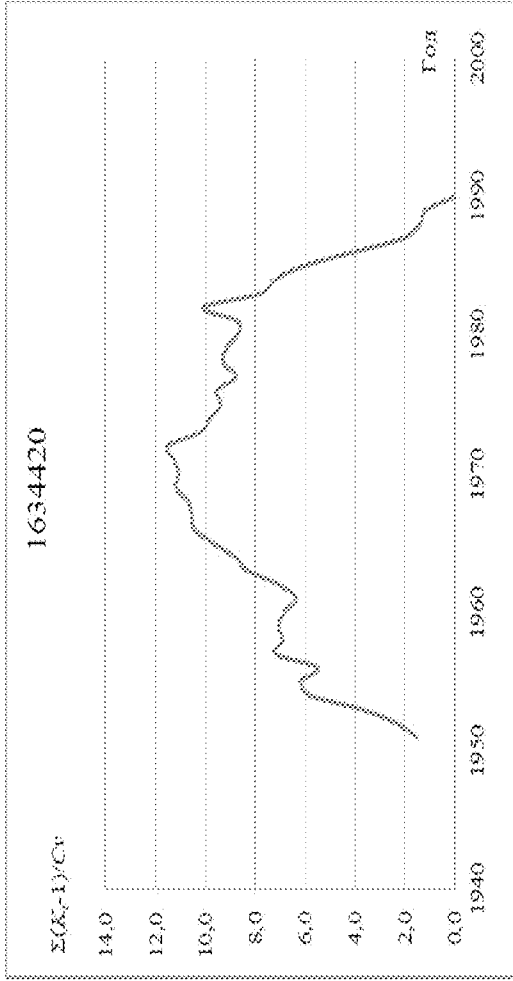
2')



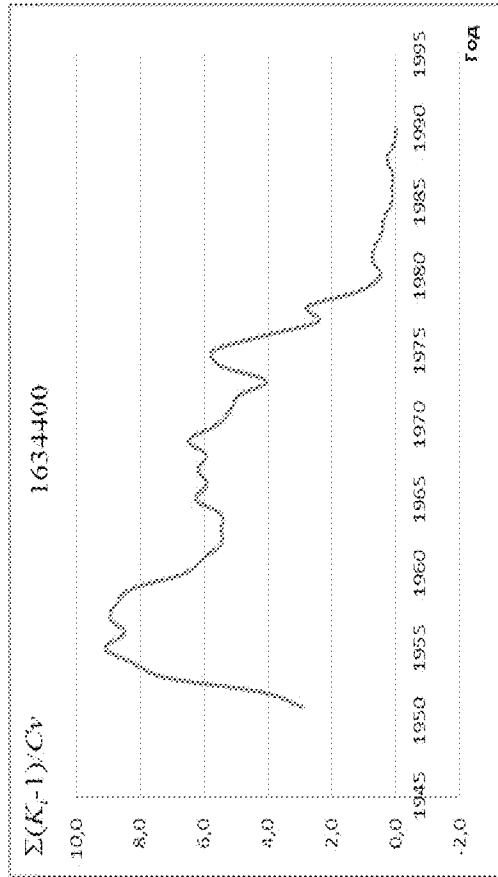
d)



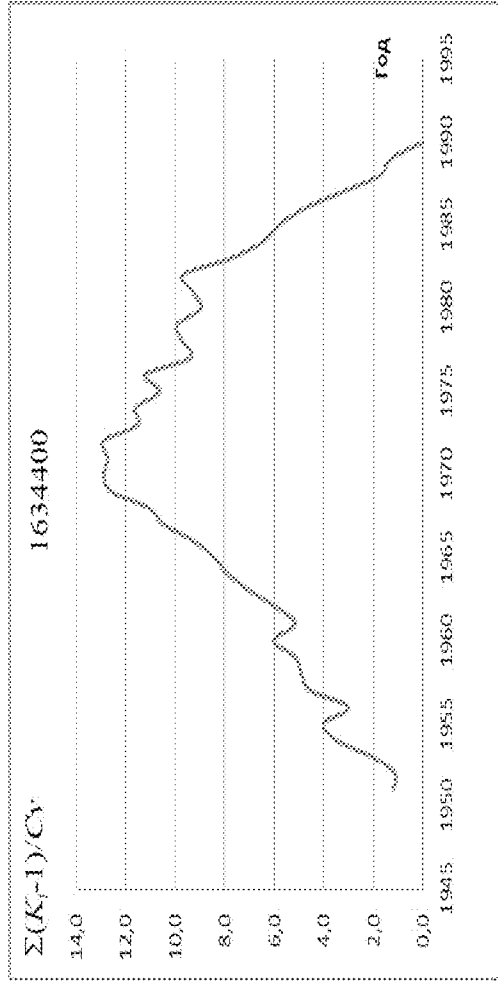
d')



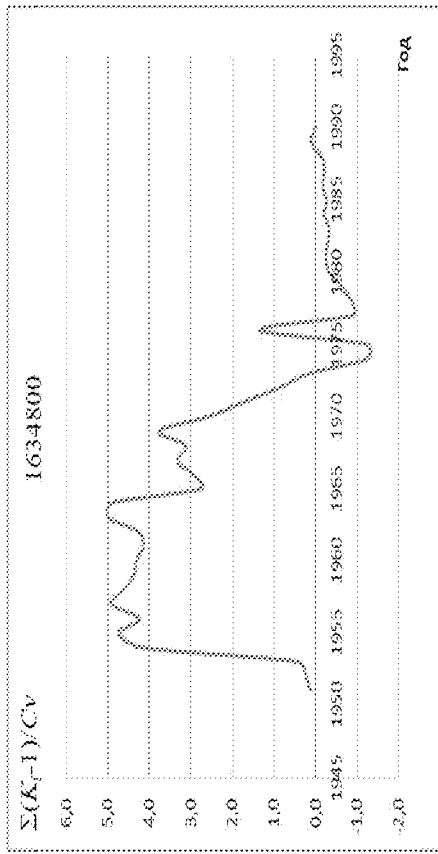
e)



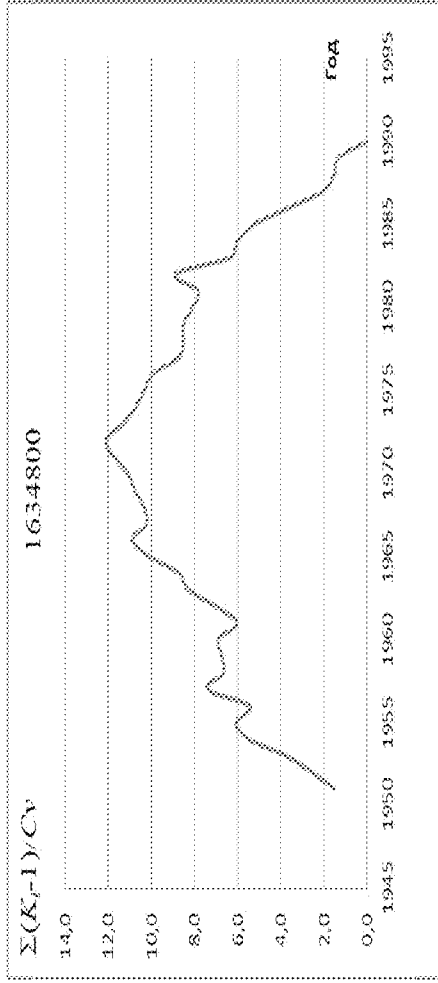
e')



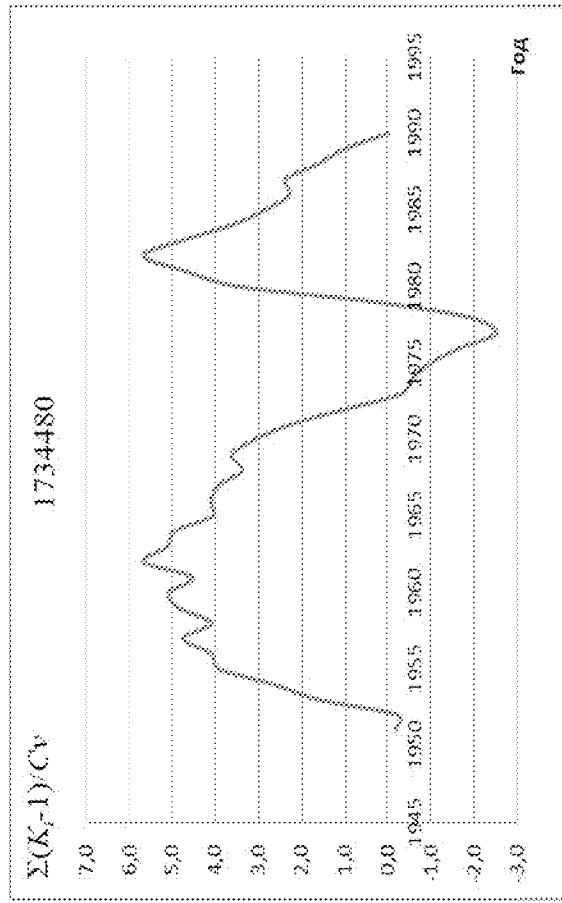
∂C



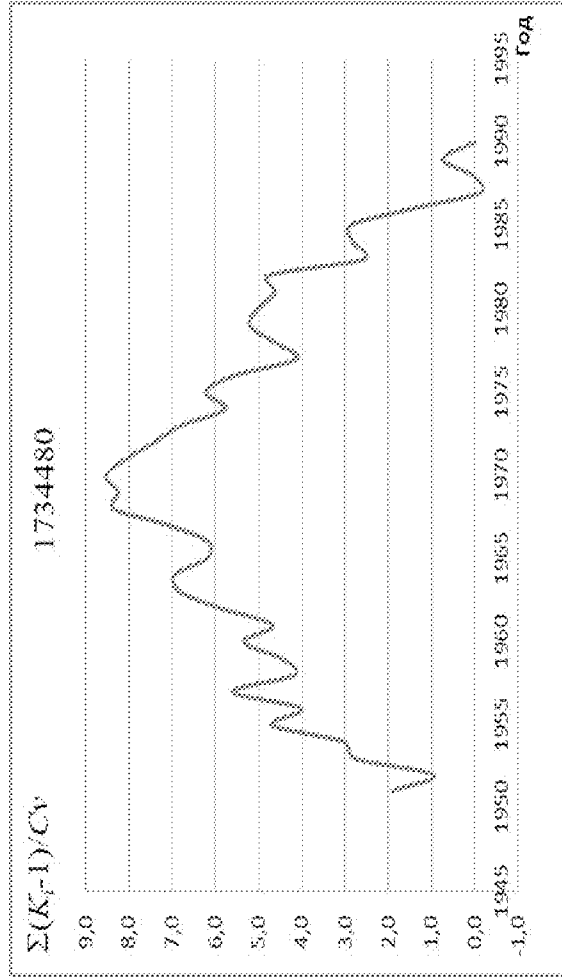
$\partial C'$



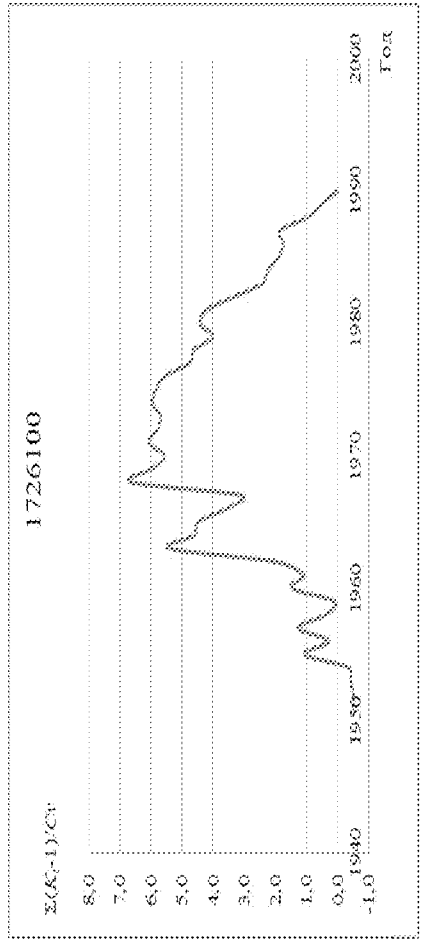
u



u'



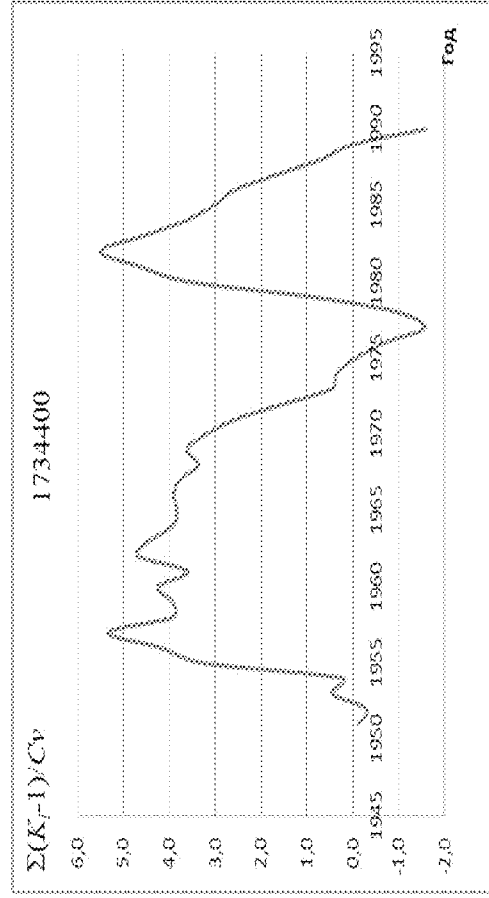
κ)



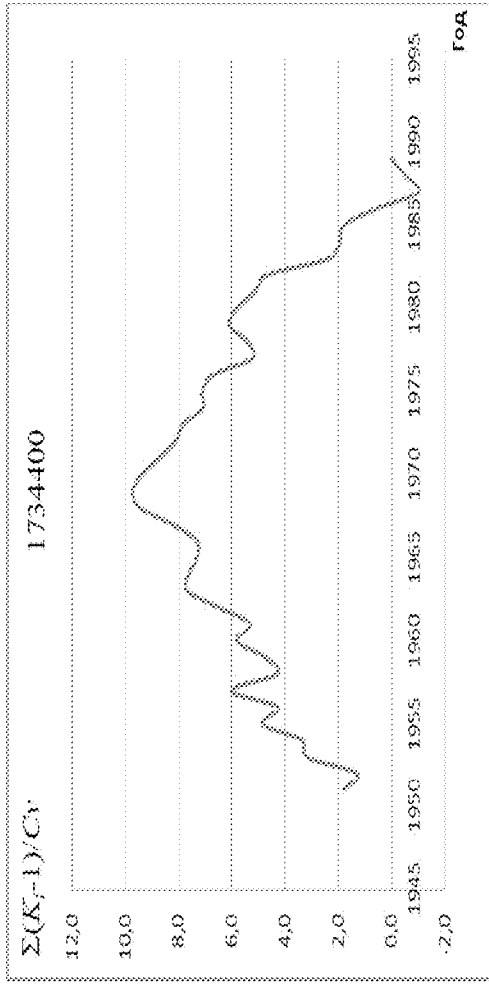
κ)



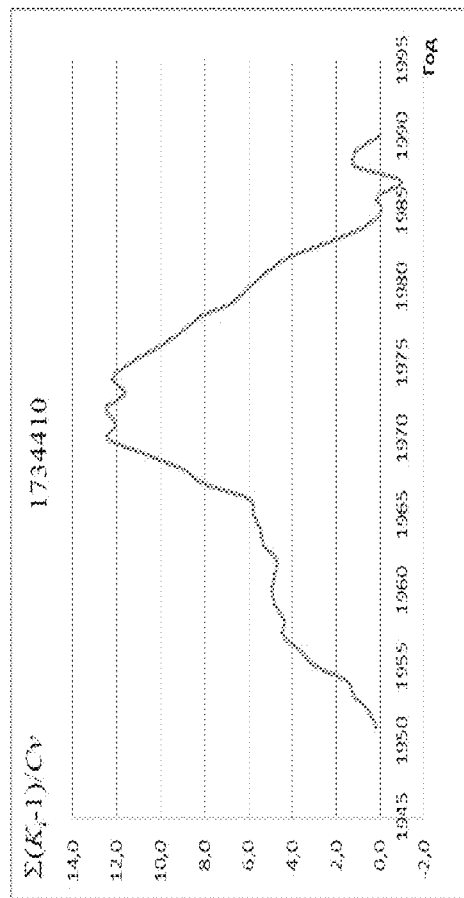
π)



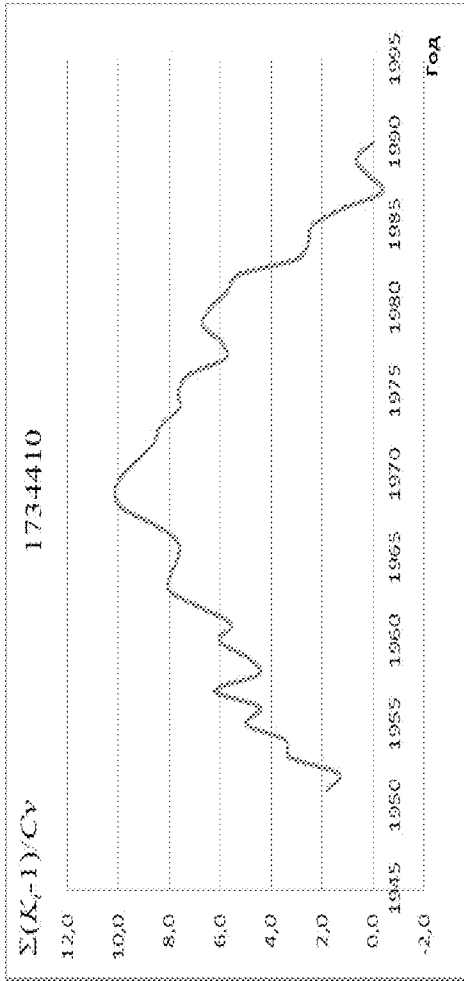
π)



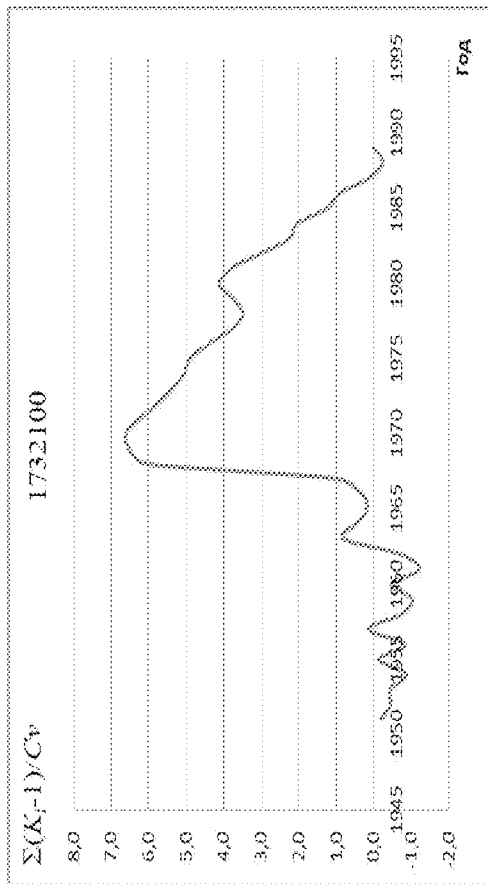
M)



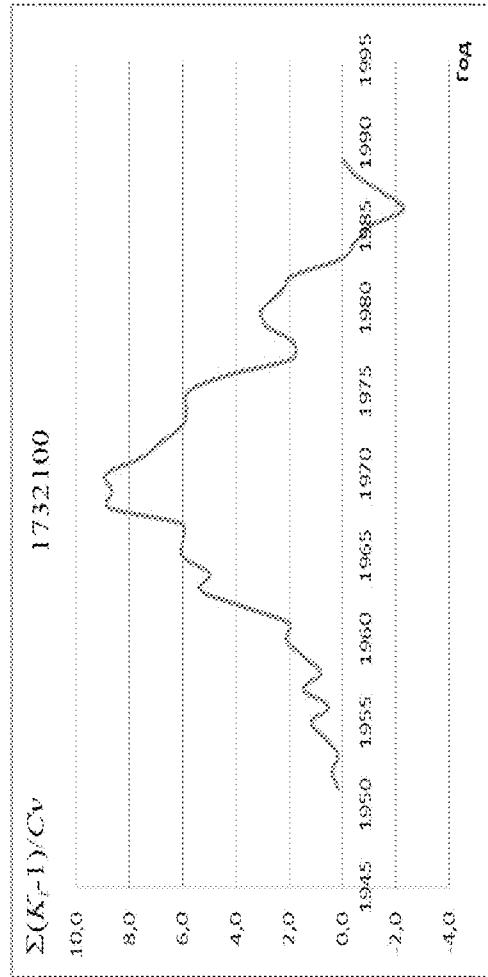
M')



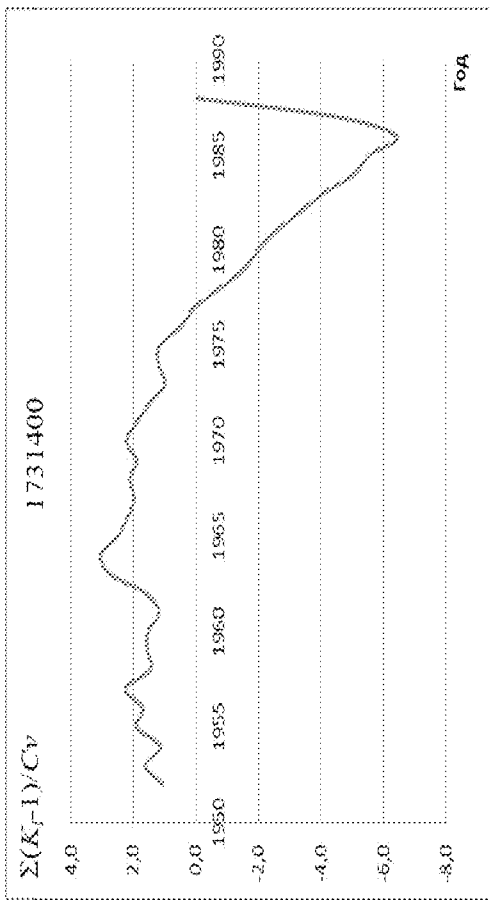
H)



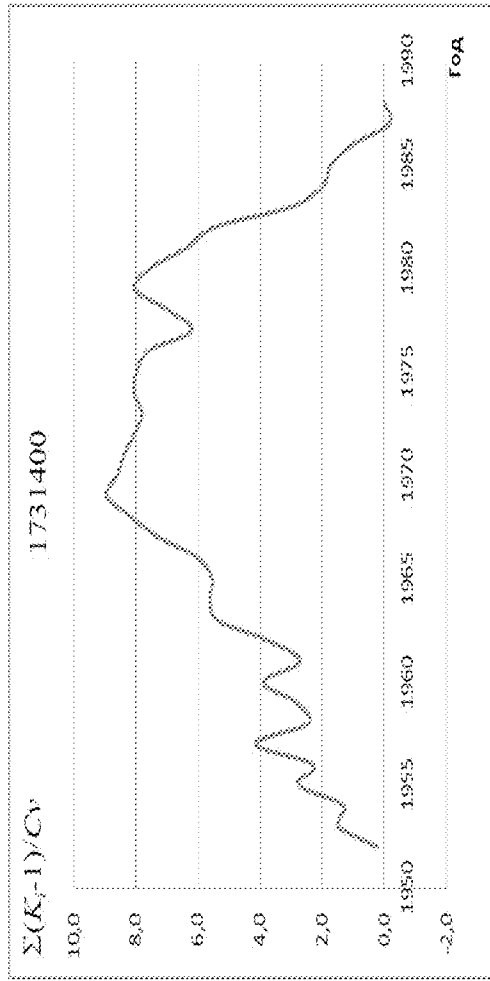
H')



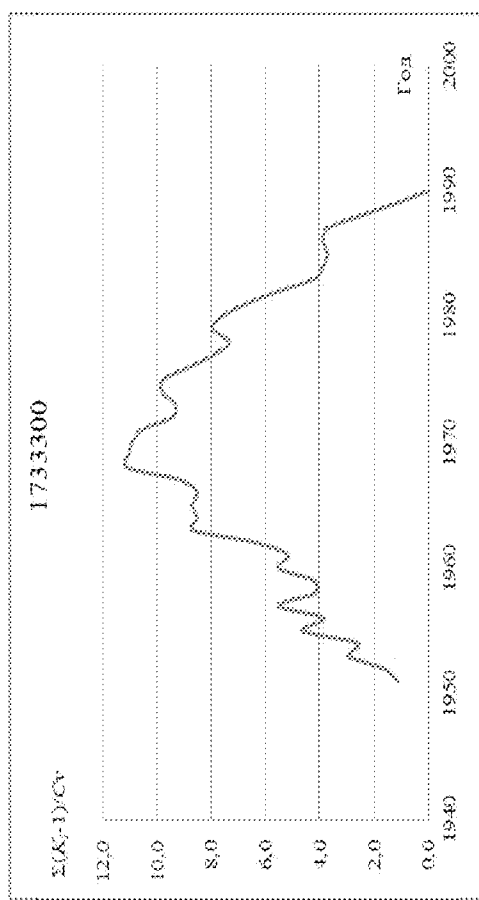
o) $\Sigma(K_i-1)/C_i$



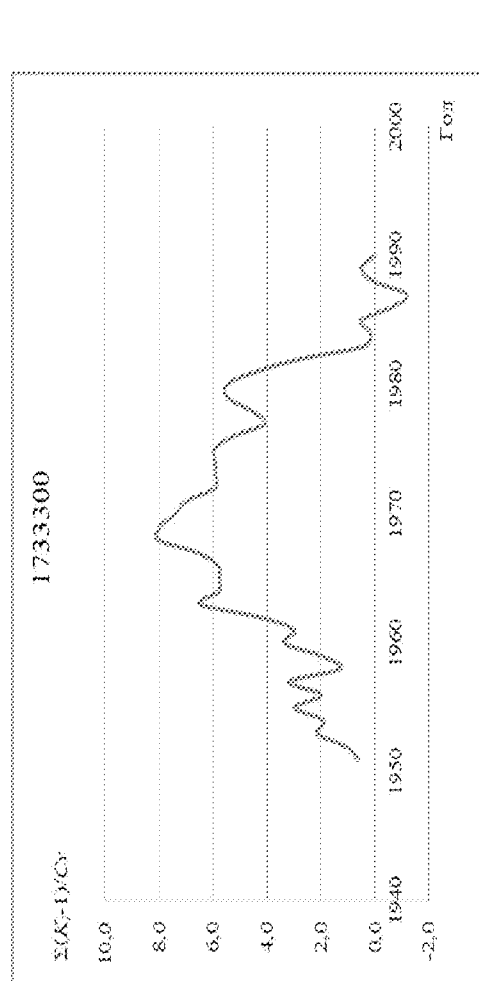
o) $\Sigma(K_i-1)/C_i$



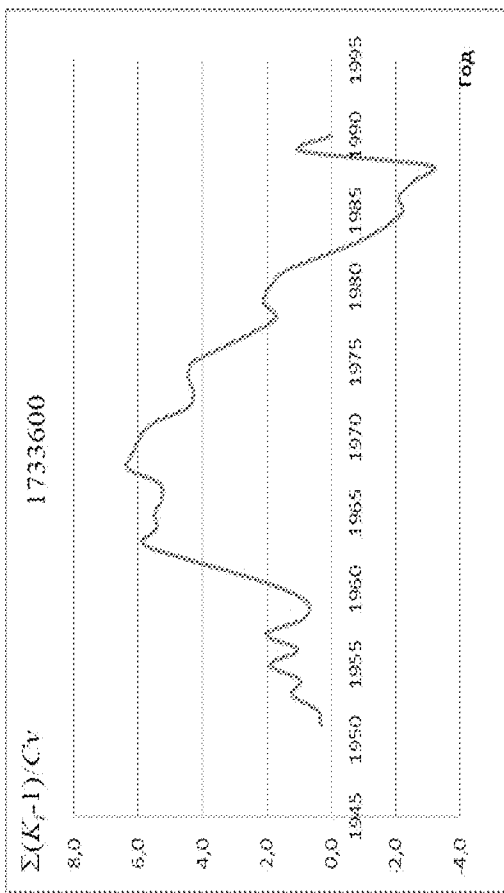
n) $\Sigma(K_i-1)/C_i$



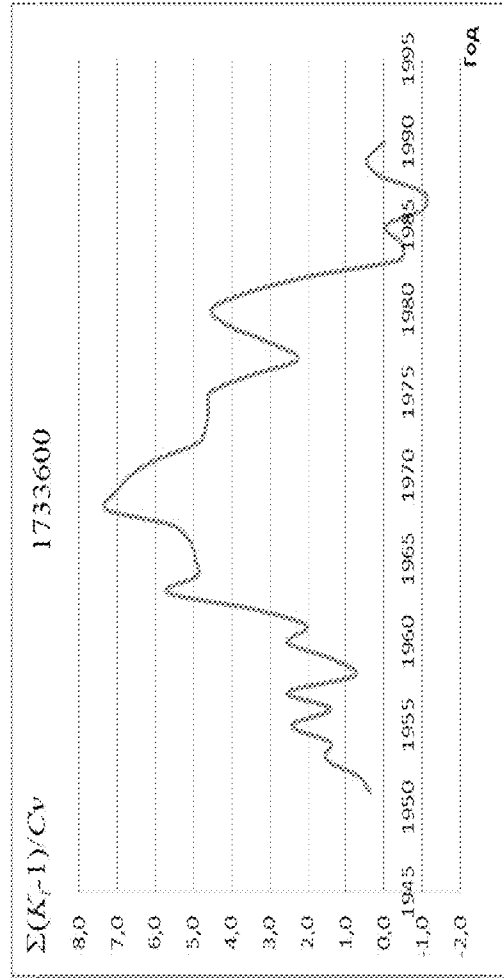
n) $\Sigma(K_i-1)/C_i$



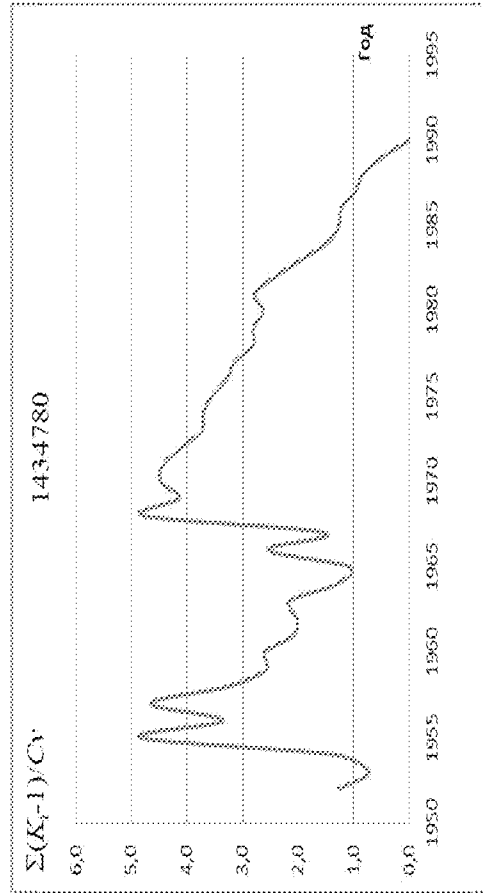
p)



p)



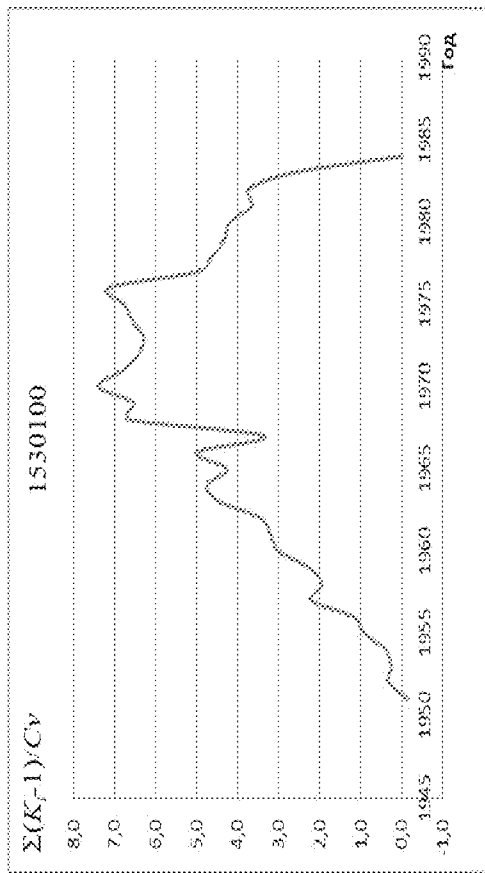
c)



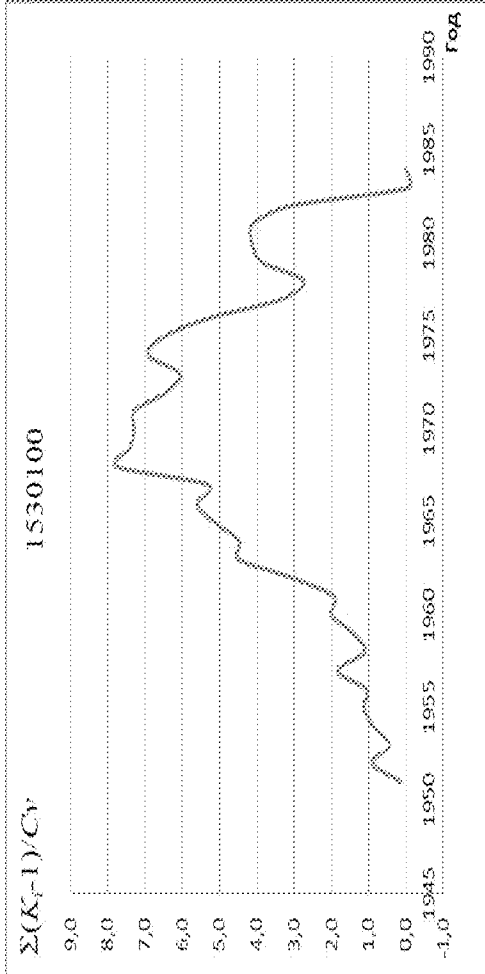
c)



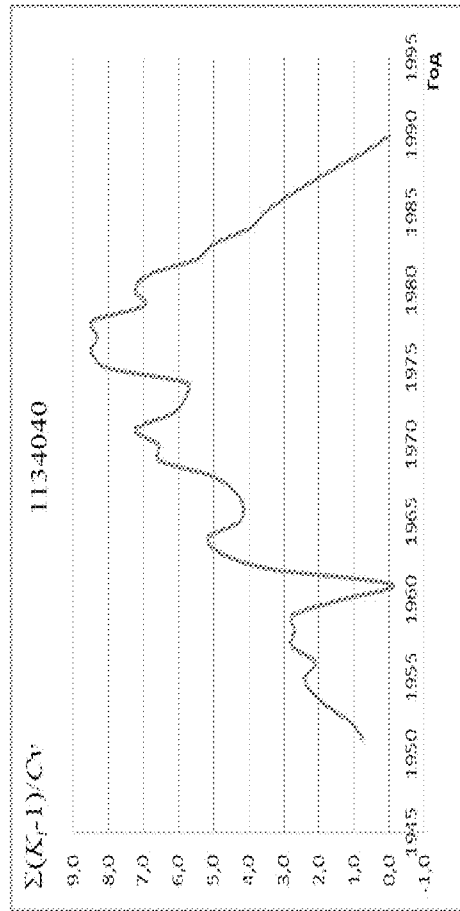
m)



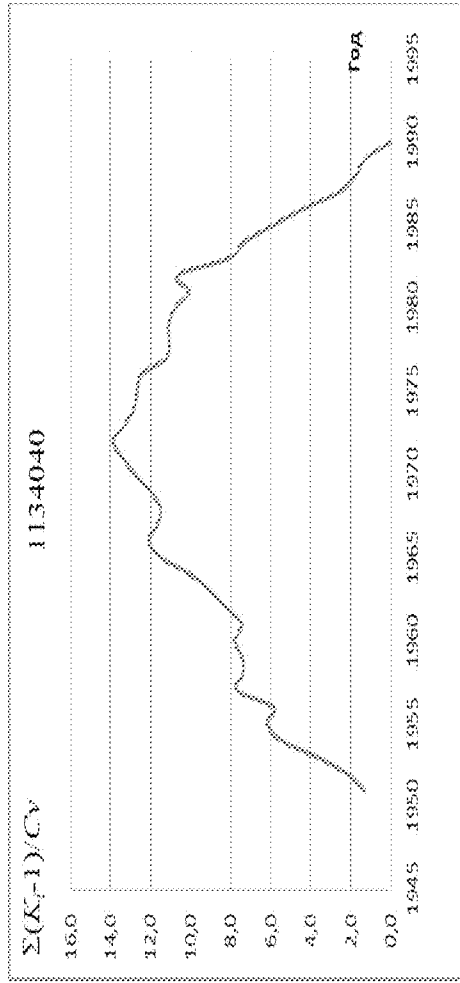
m')



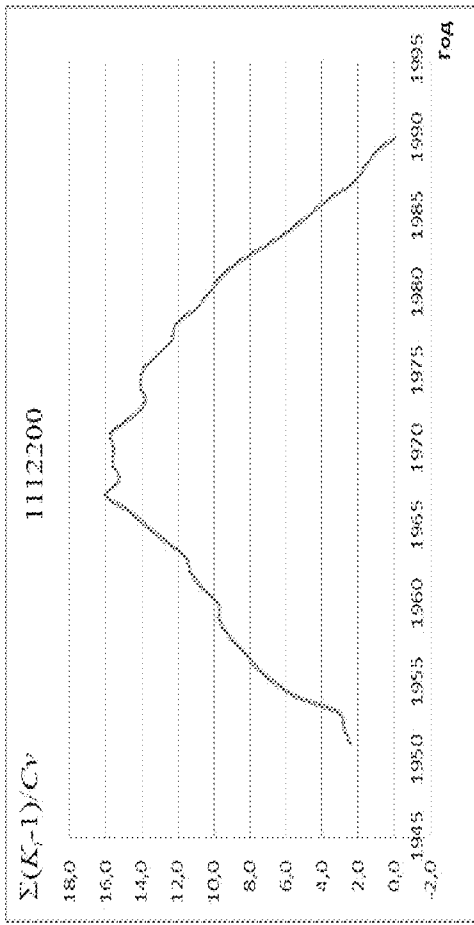
y)



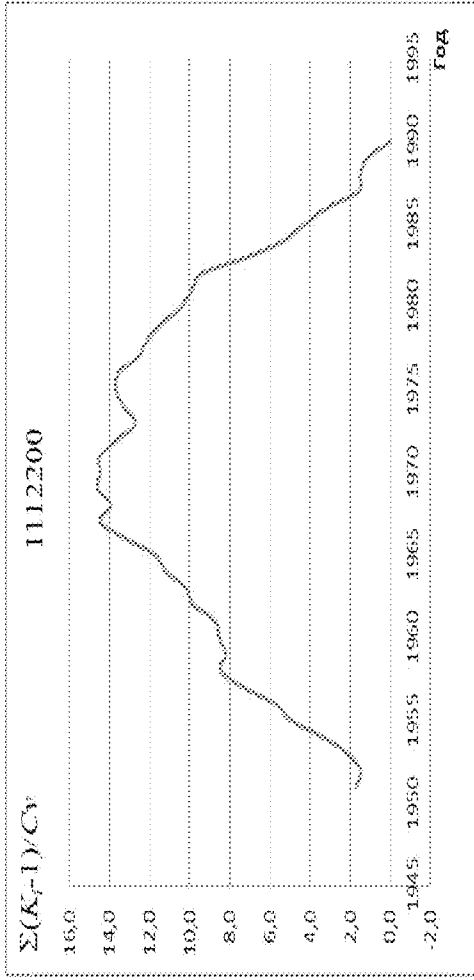
y')



ϕ)



ϕ')



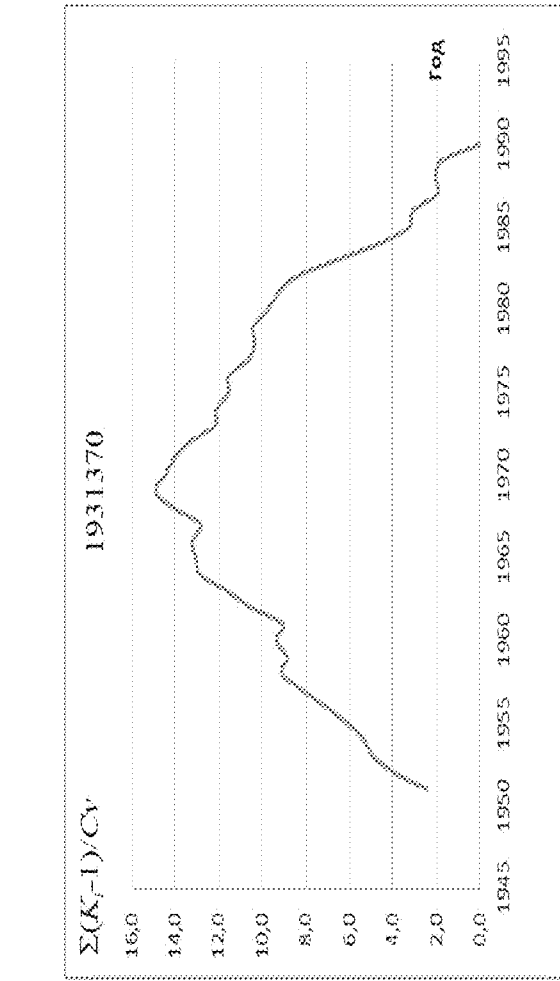
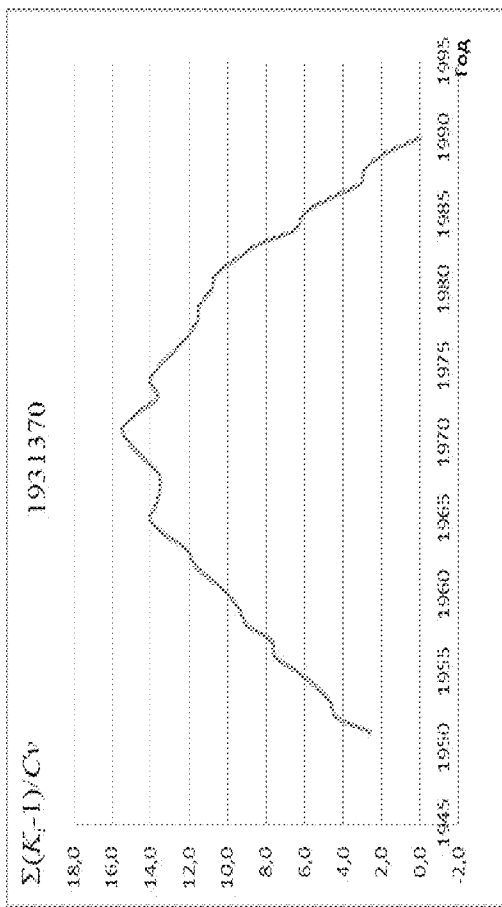
x)



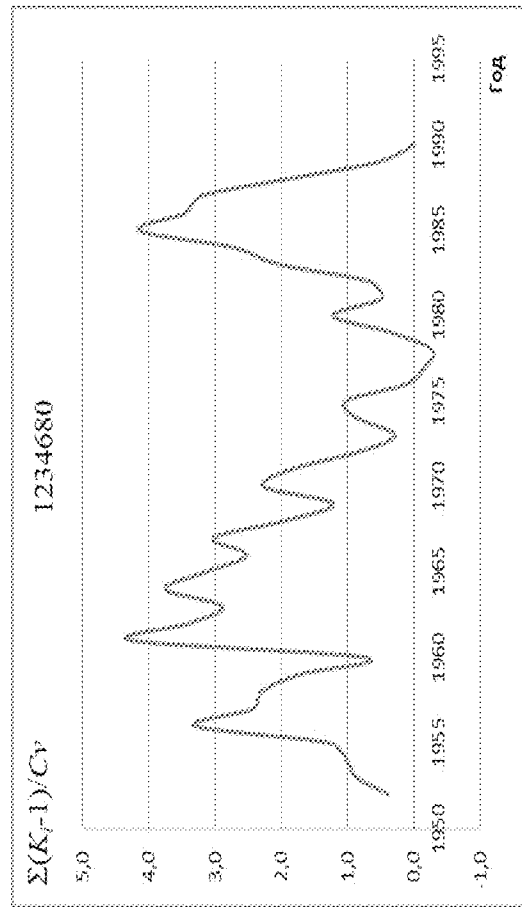
x')



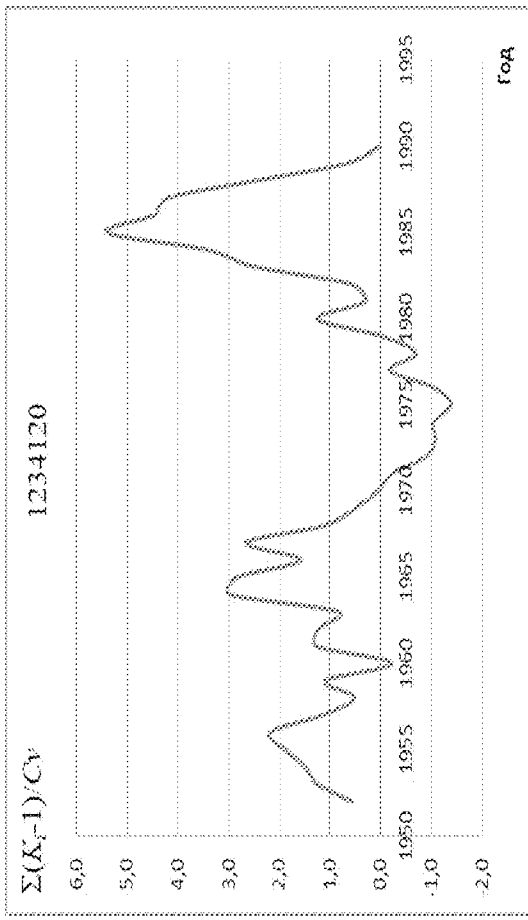
u)



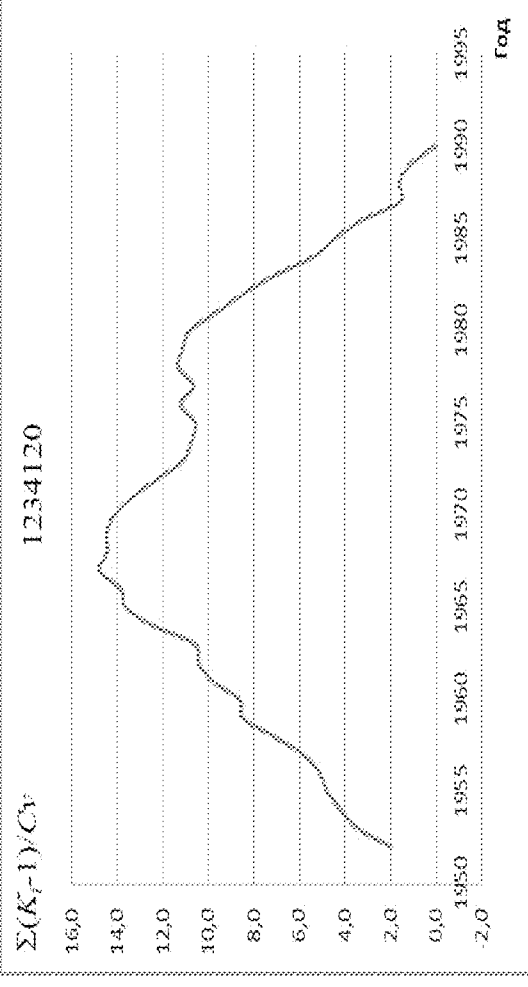
u)



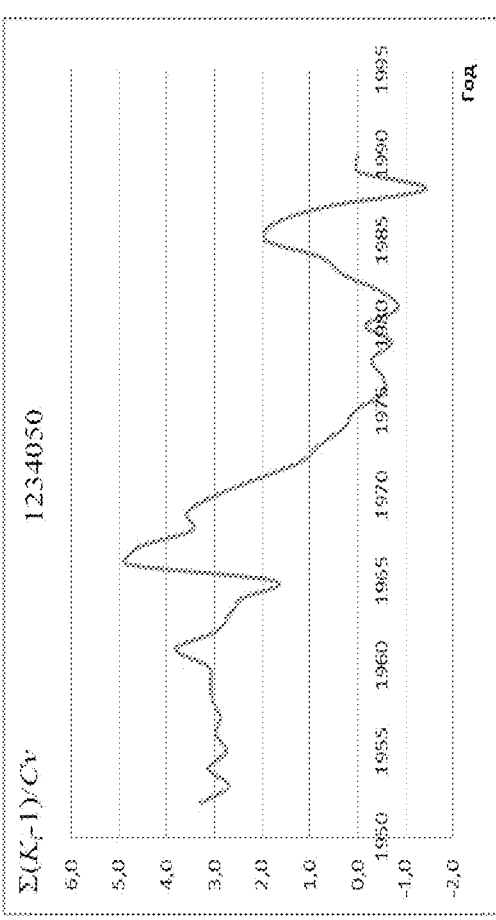
w)



w)



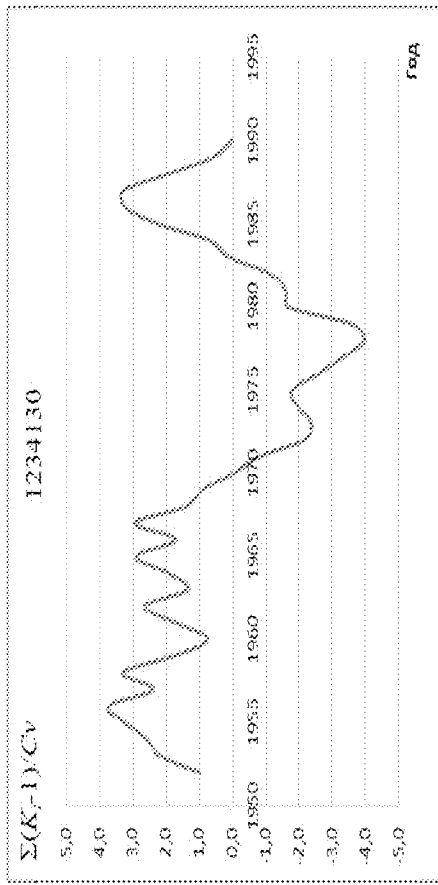
w)



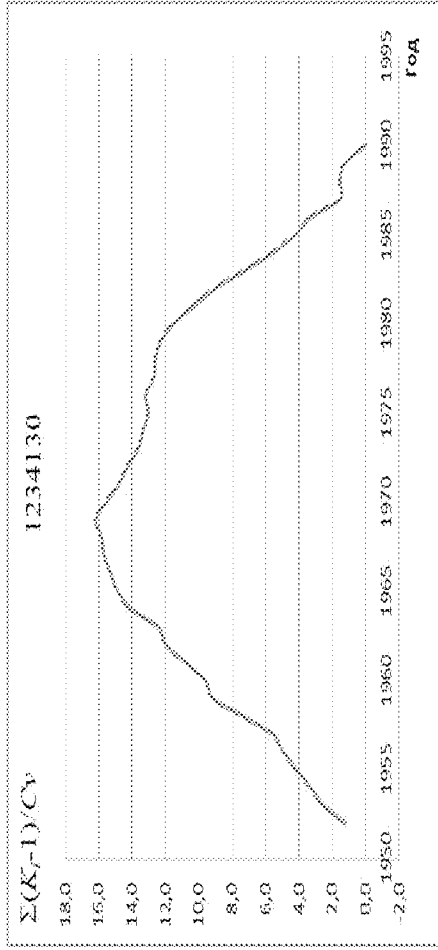
w)



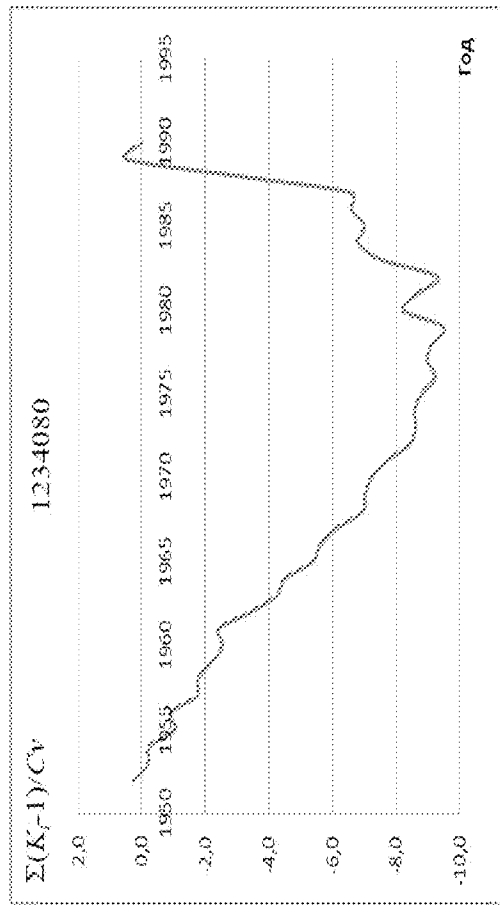
9)



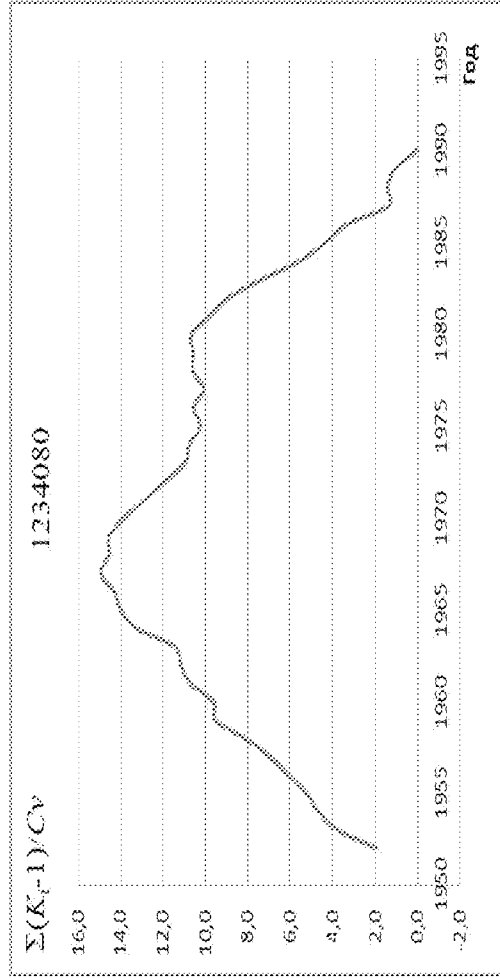
9')



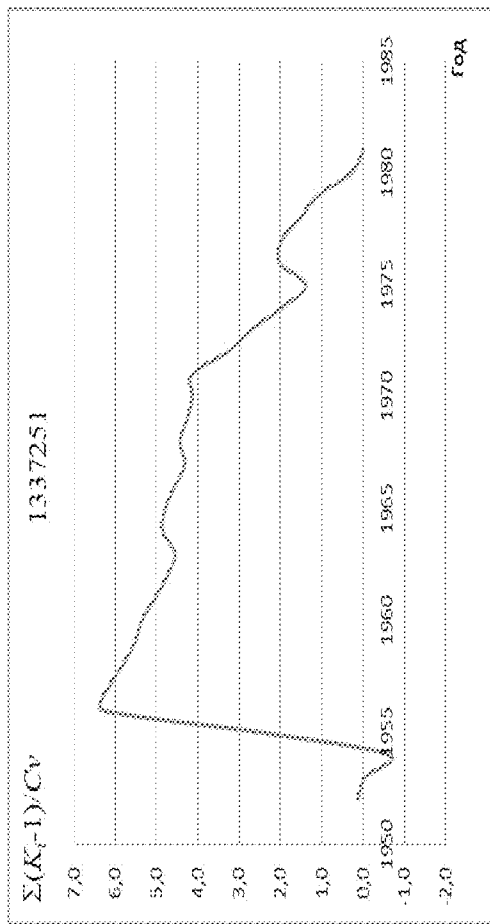
10)



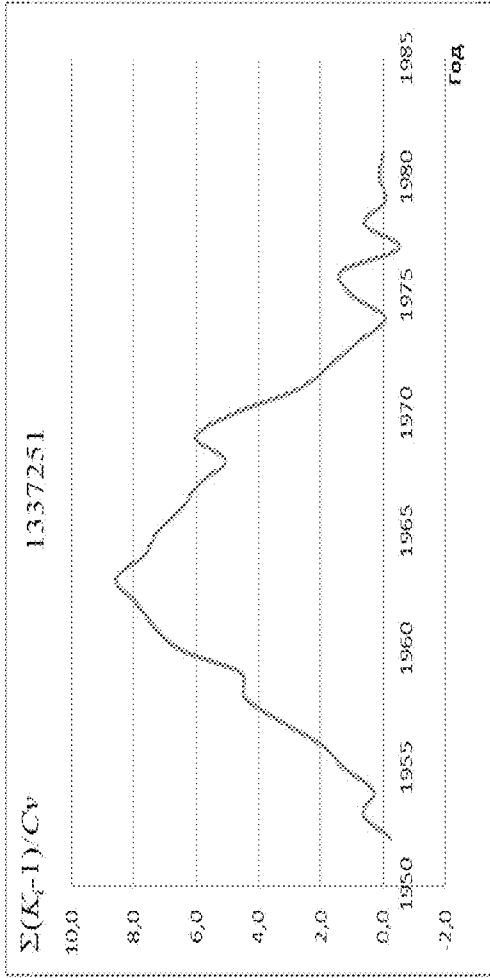
10')



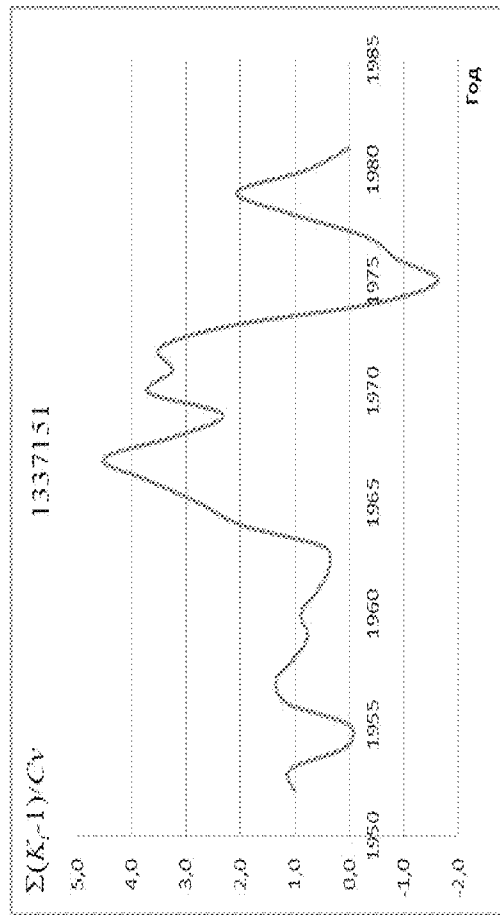
я)



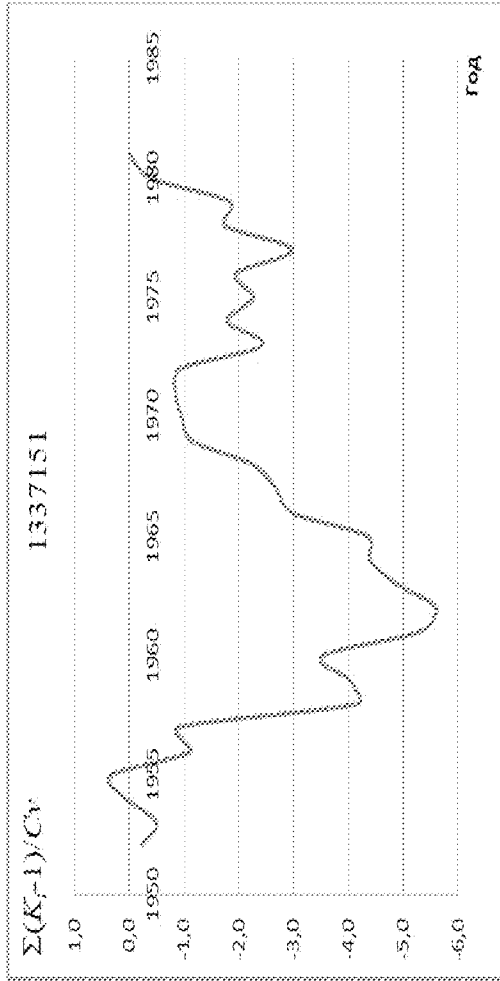
я')



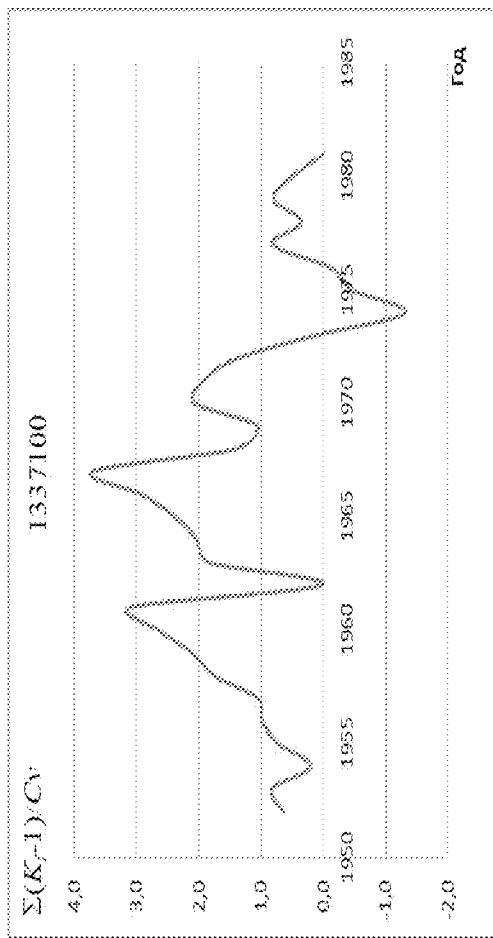
ад)



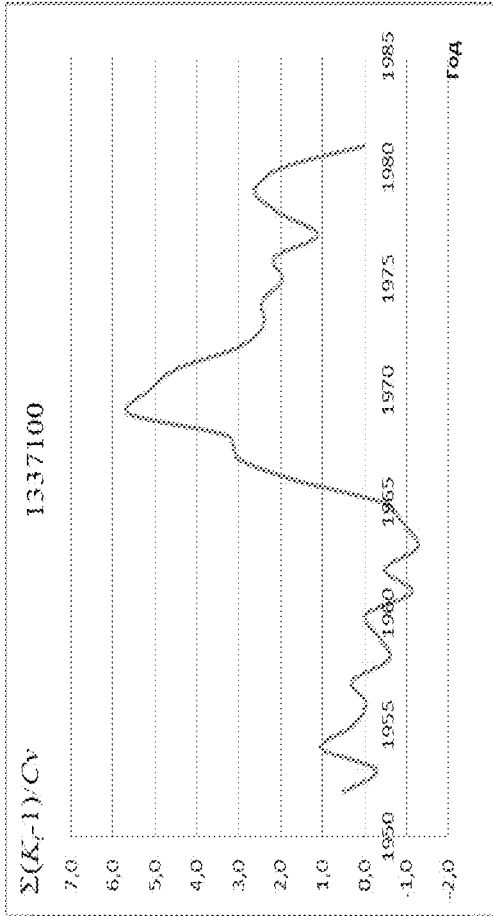
ад')



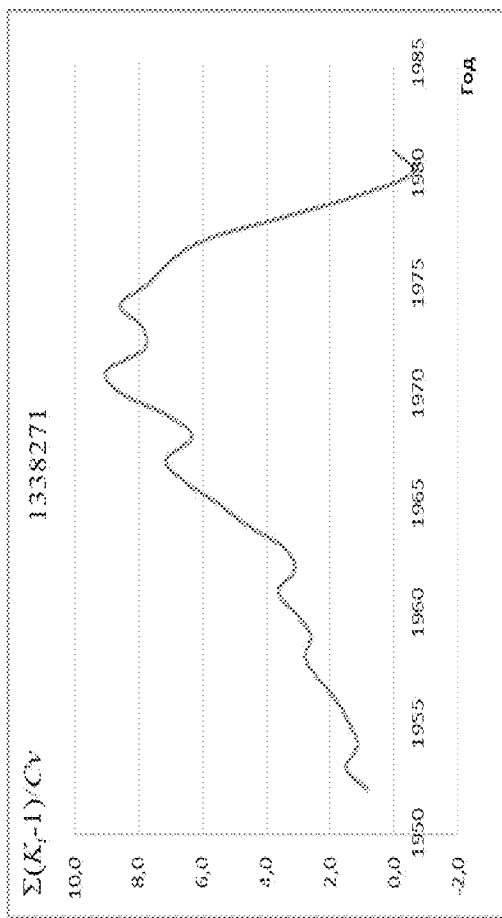
aб)



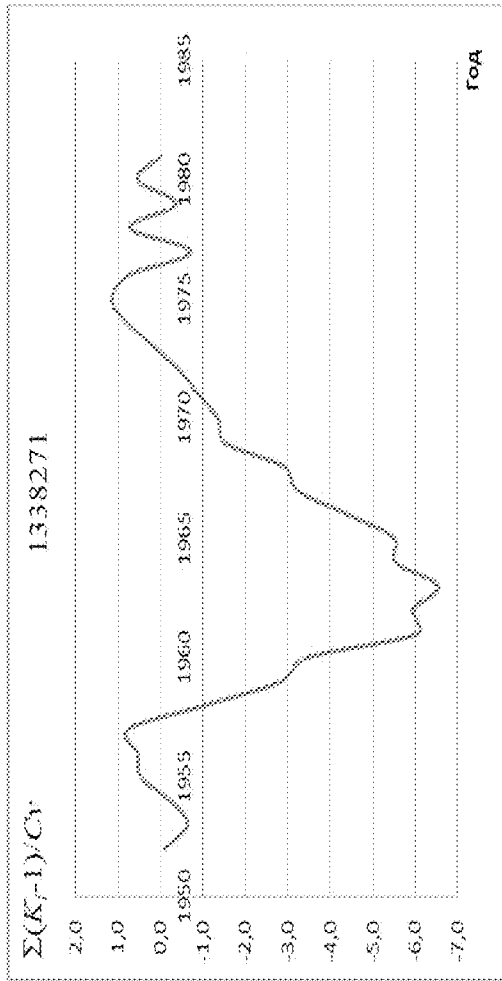
aб')



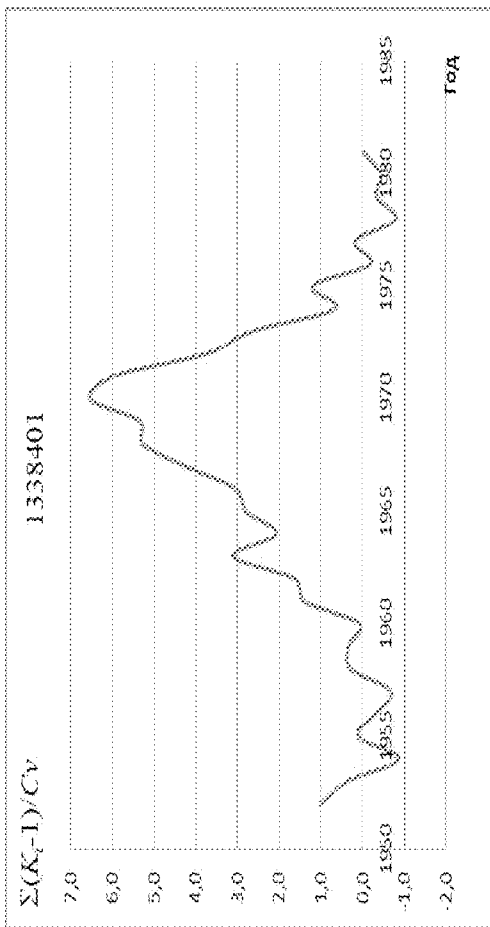
aб)



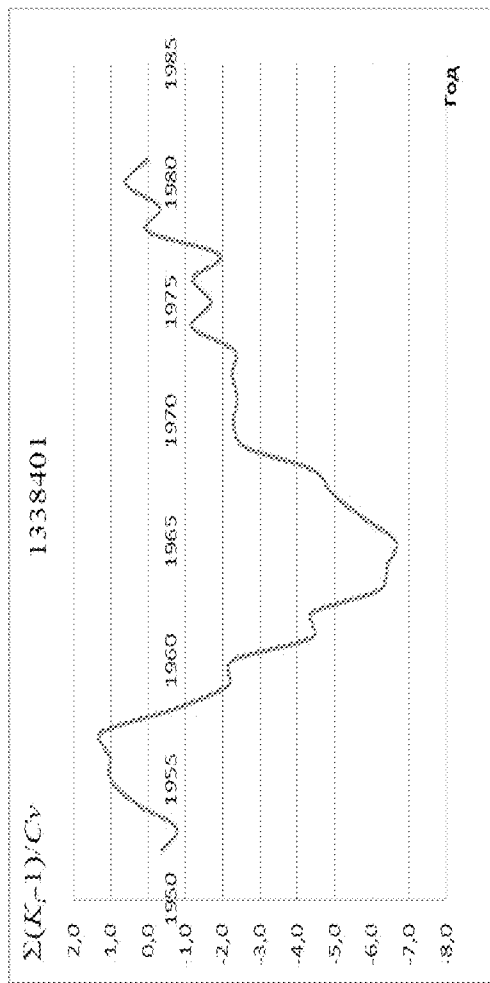
aб')



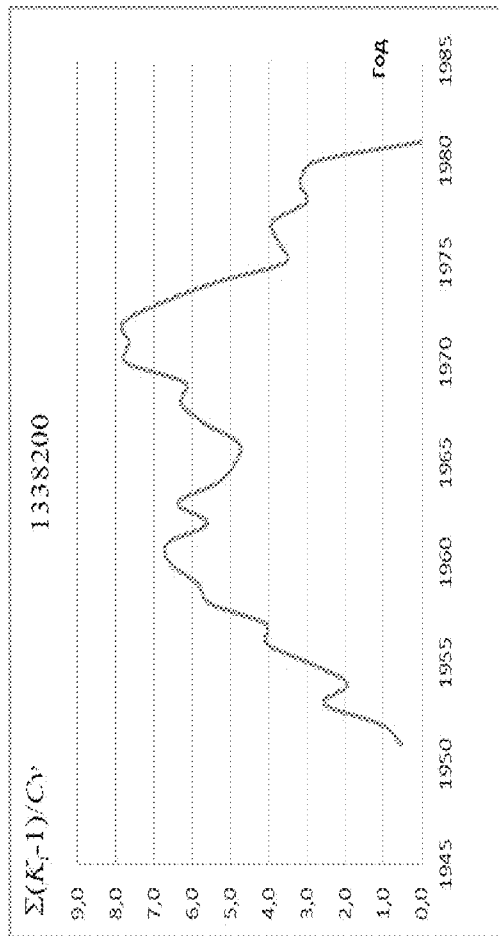
a2)



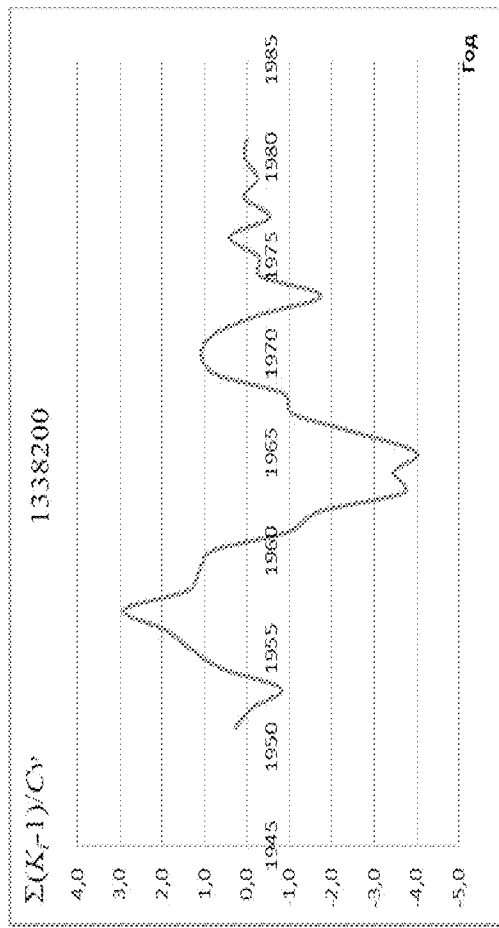
a2')



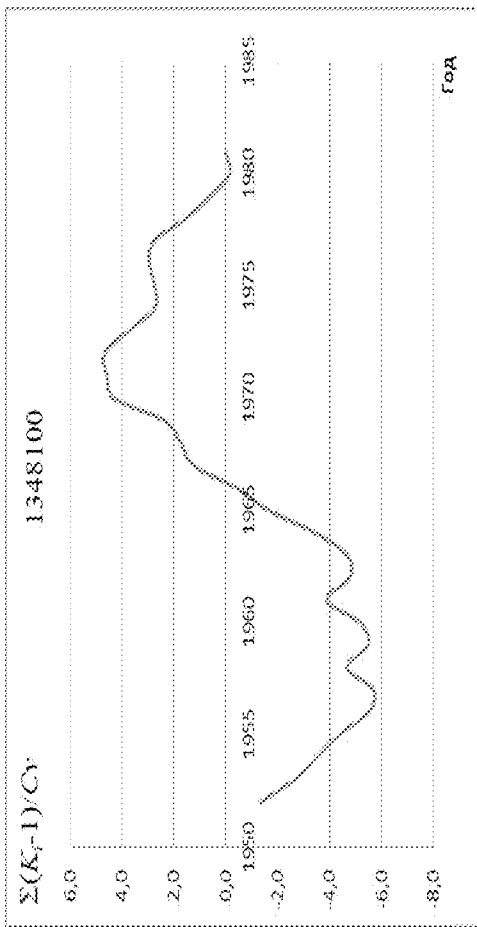
a0)



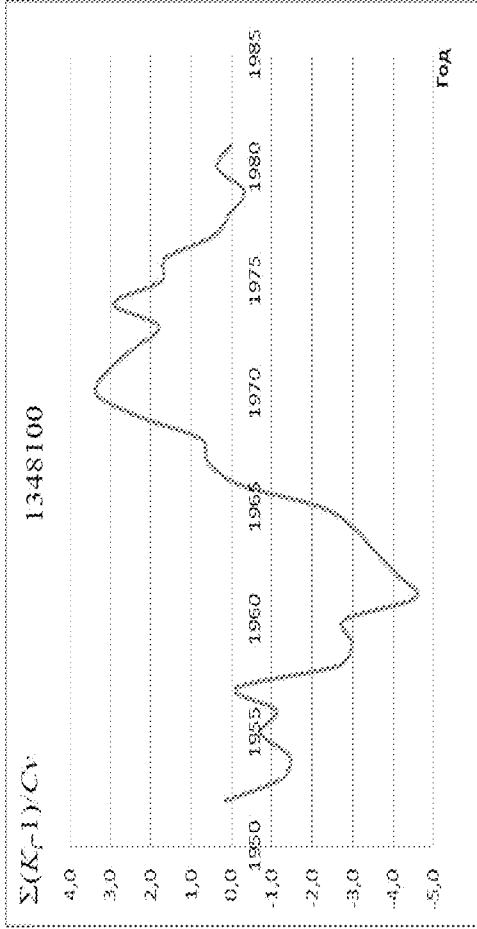
a0')



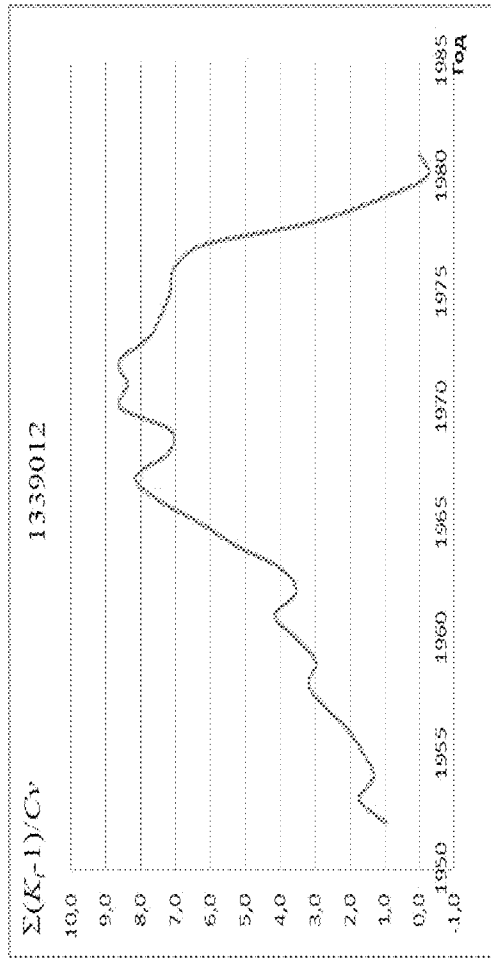
ae)



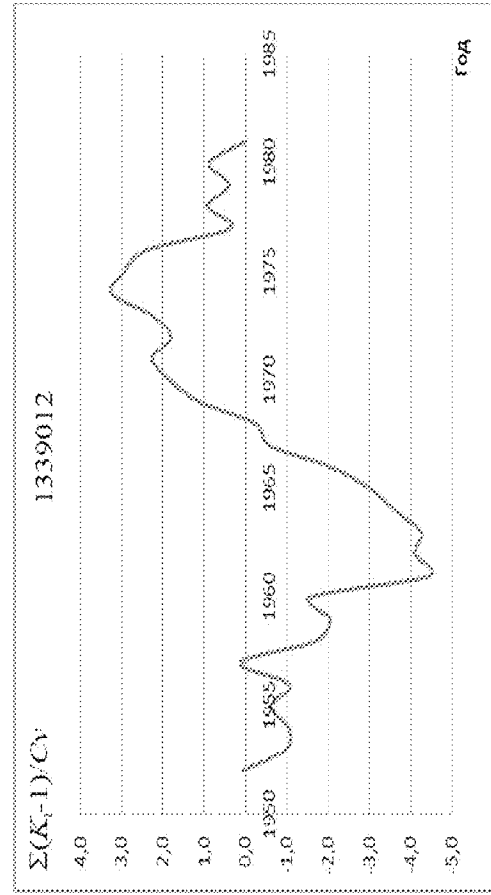
ae')



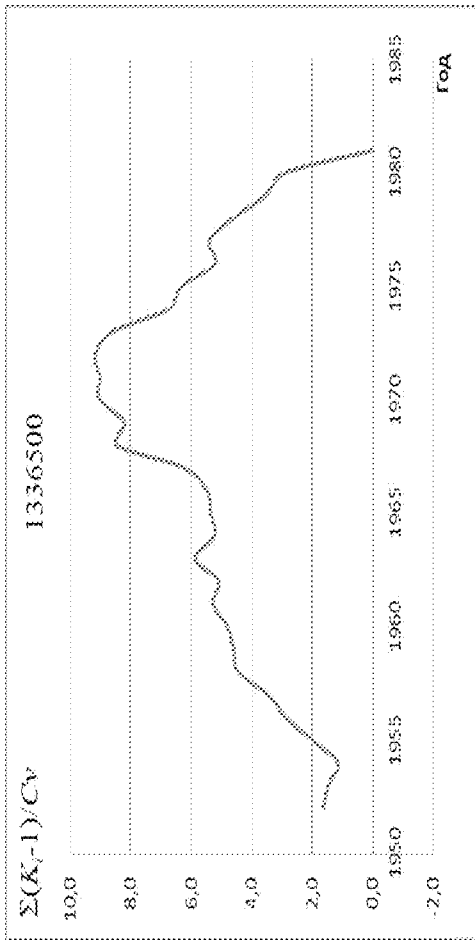
ajc)



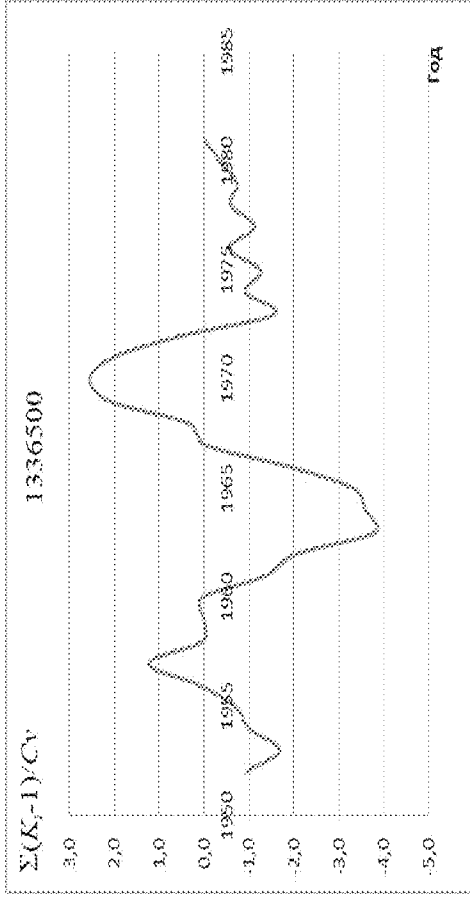
ajc')



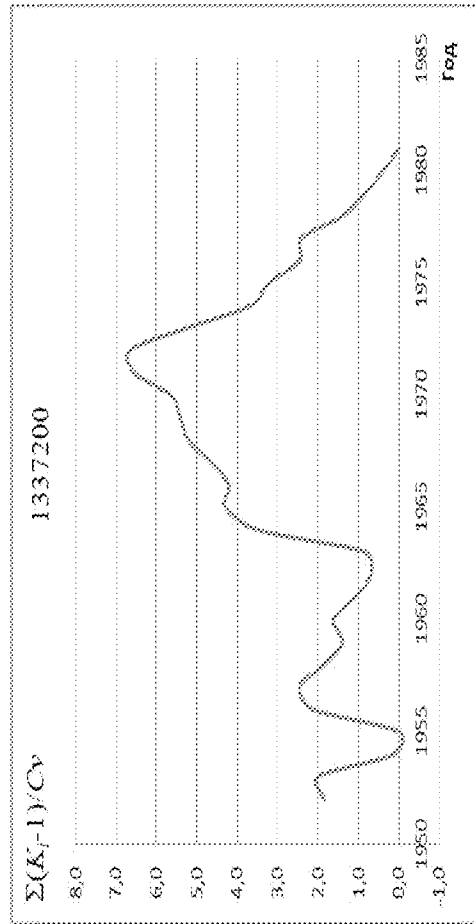
au)



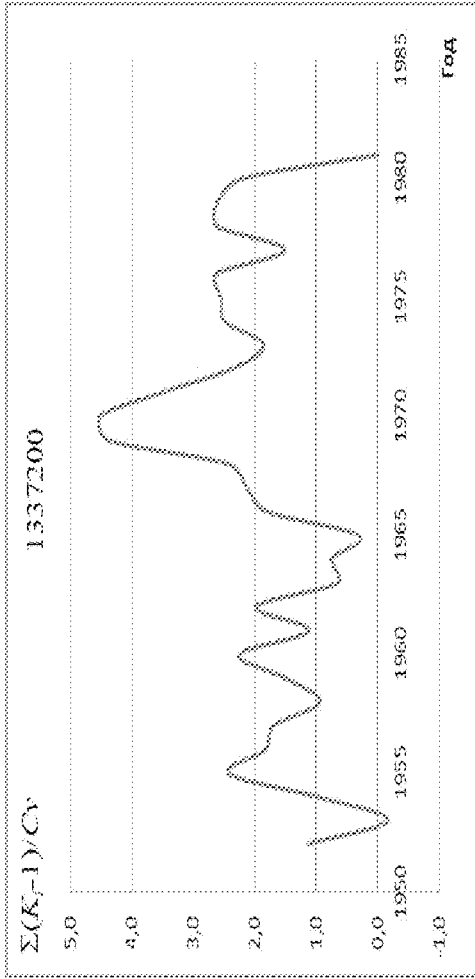
av)



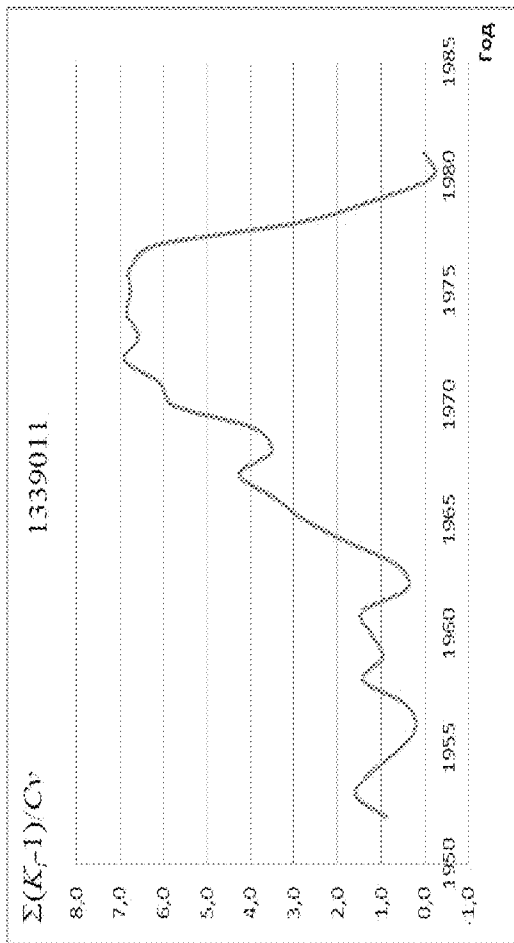
aw)



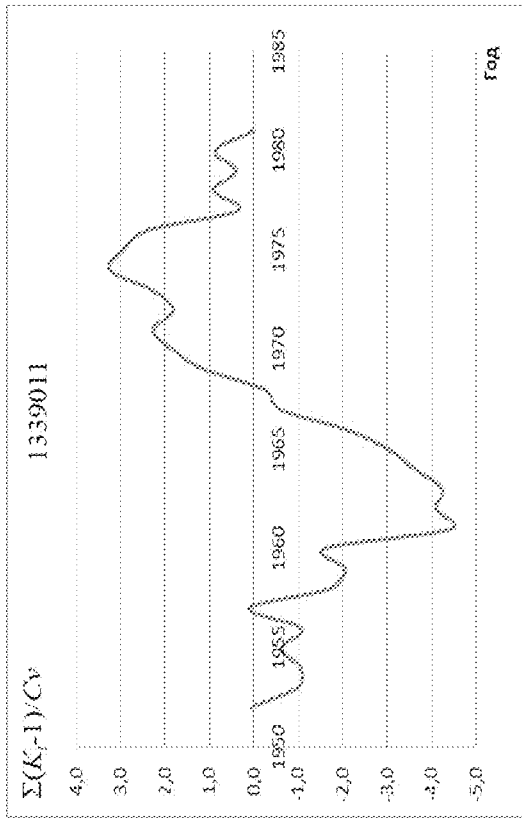
ax)



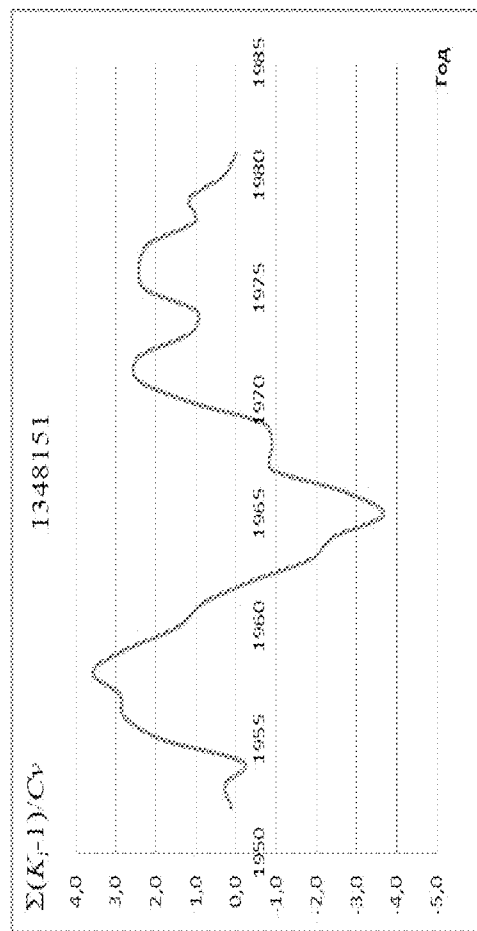
aii)



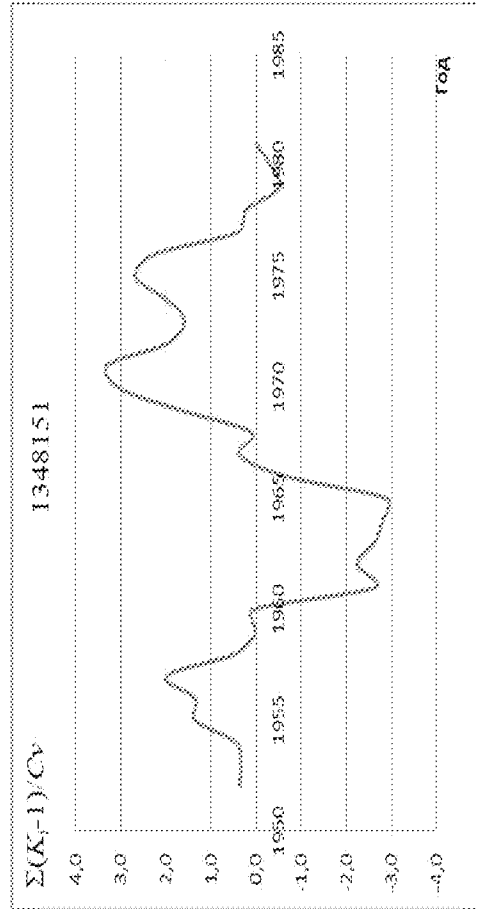
aii')



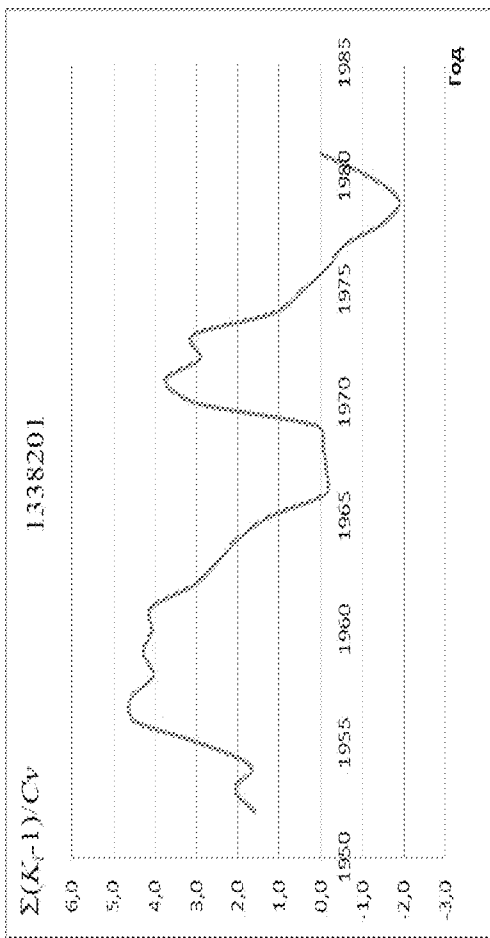
aii)



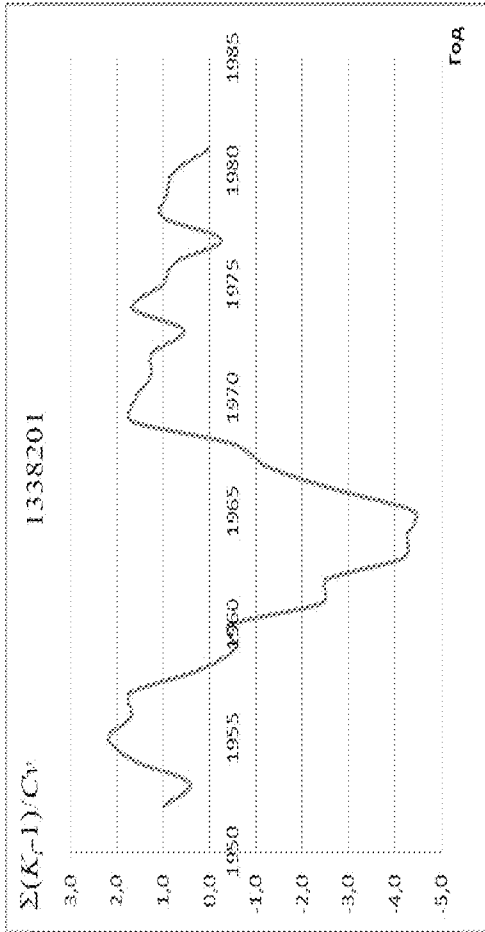
aii')



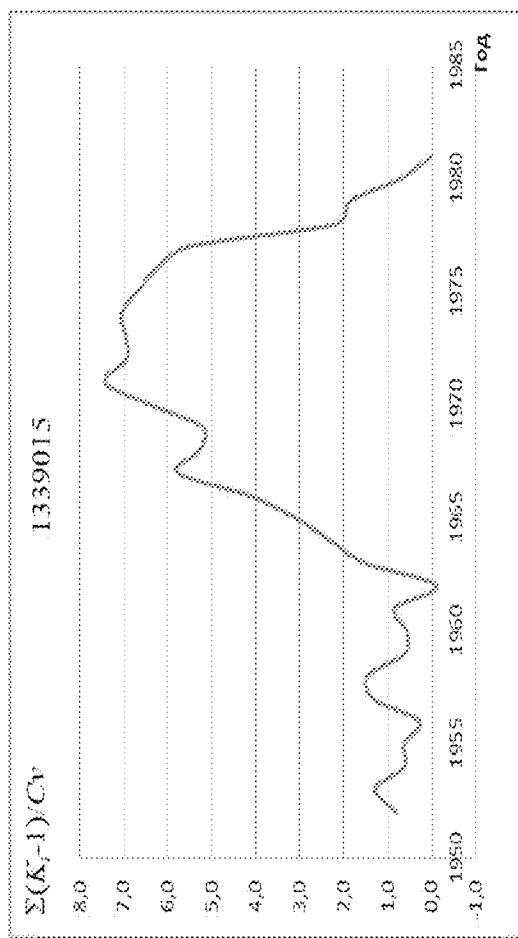
an)



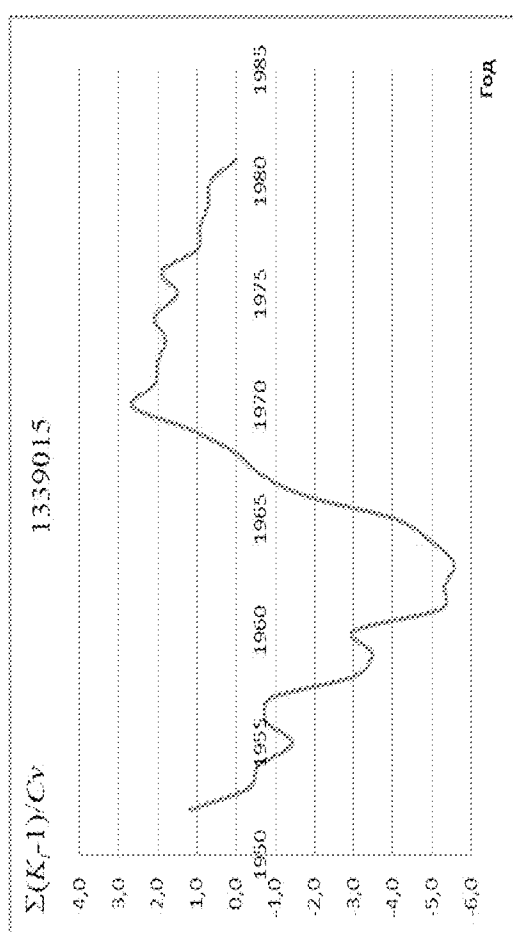
an')



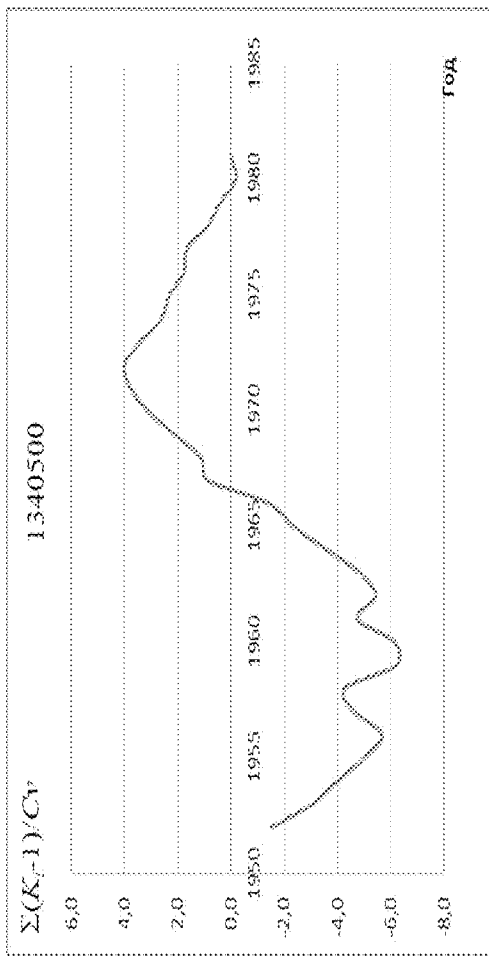
ao)



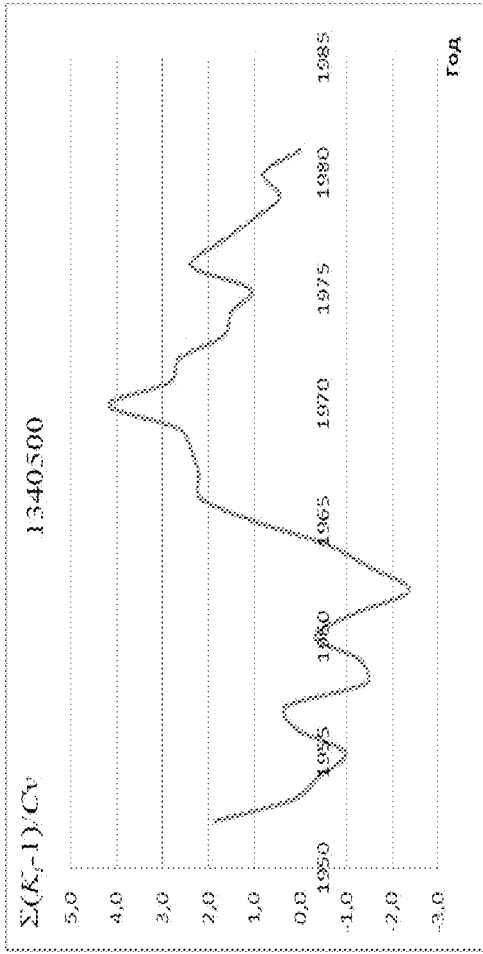
ao')



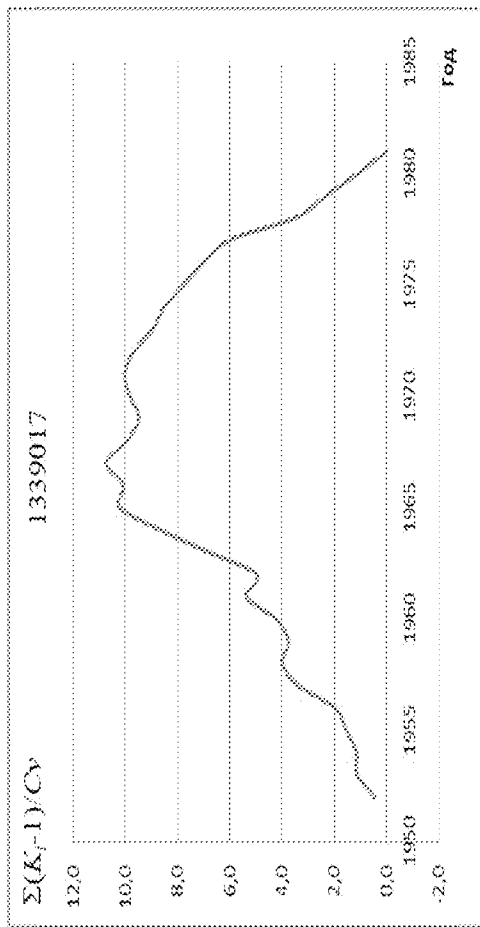
an)



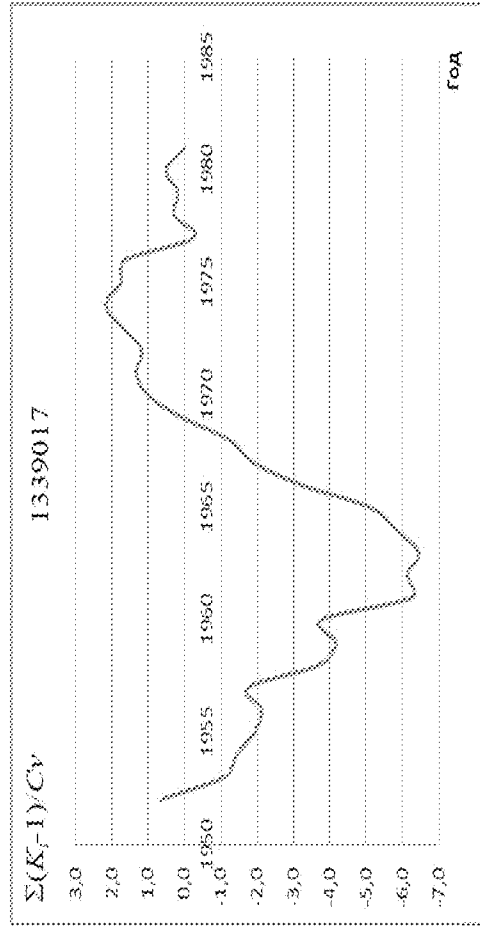
an')



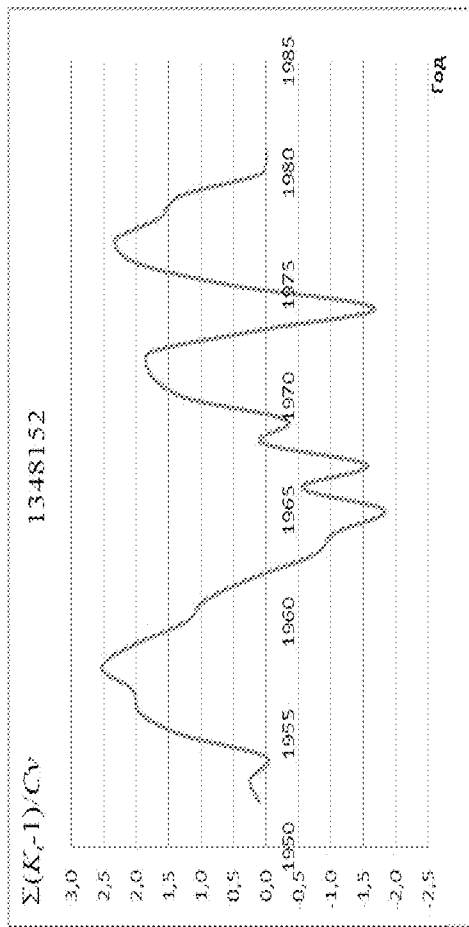
ap)



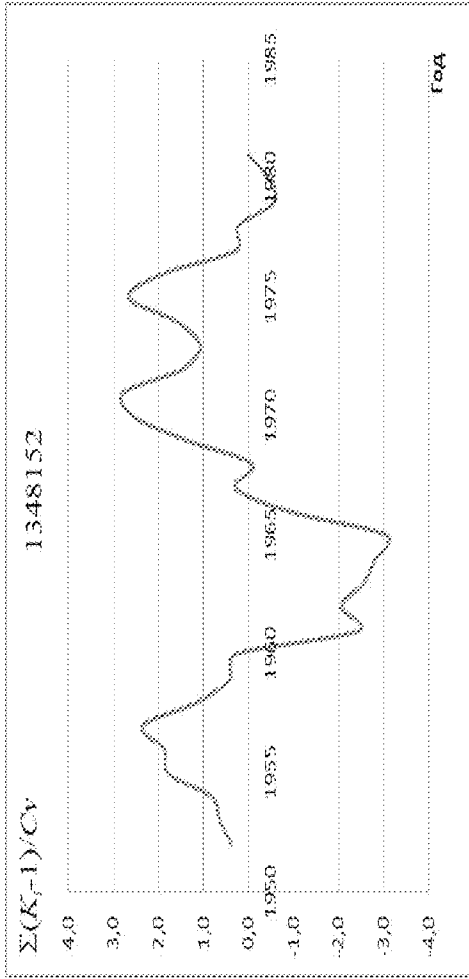
ap')



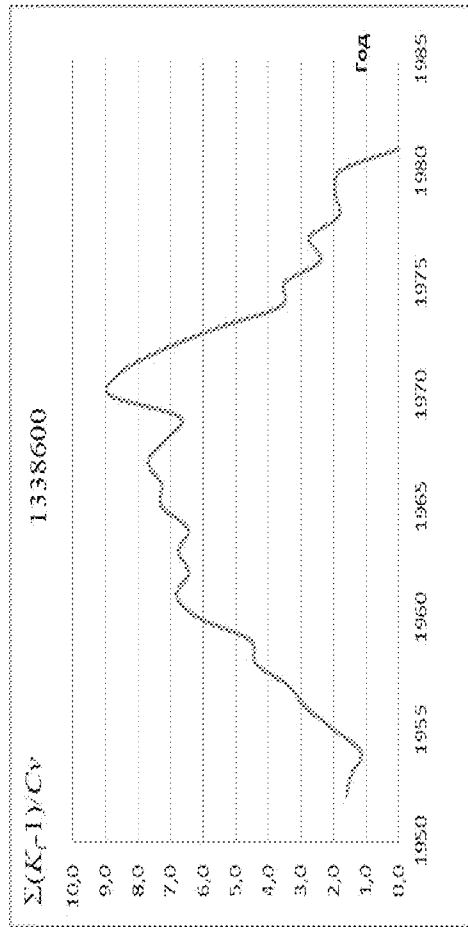
ac)



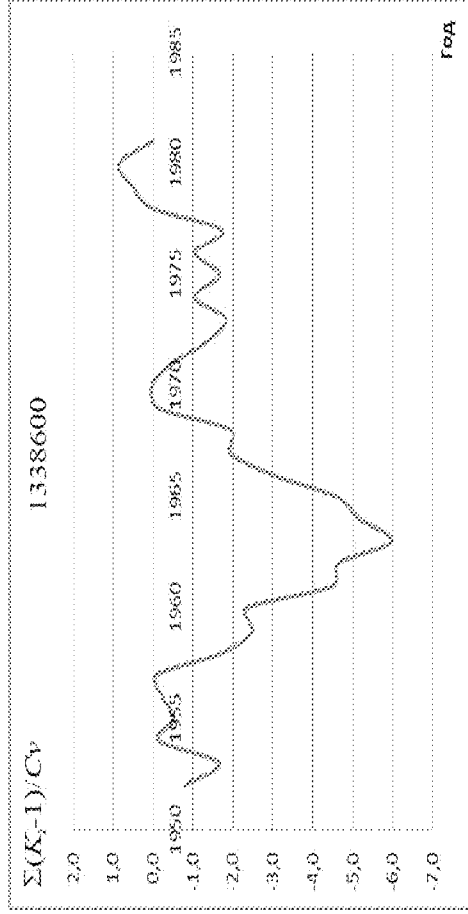
ac')



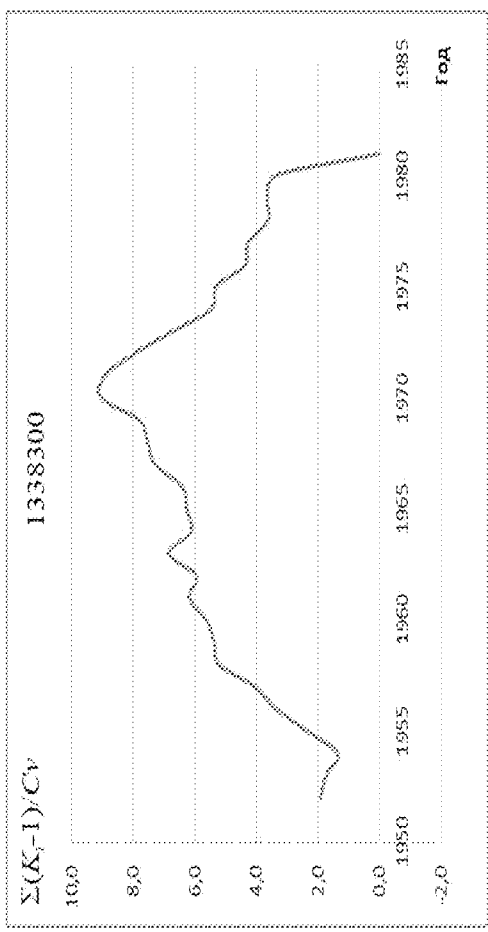
am)



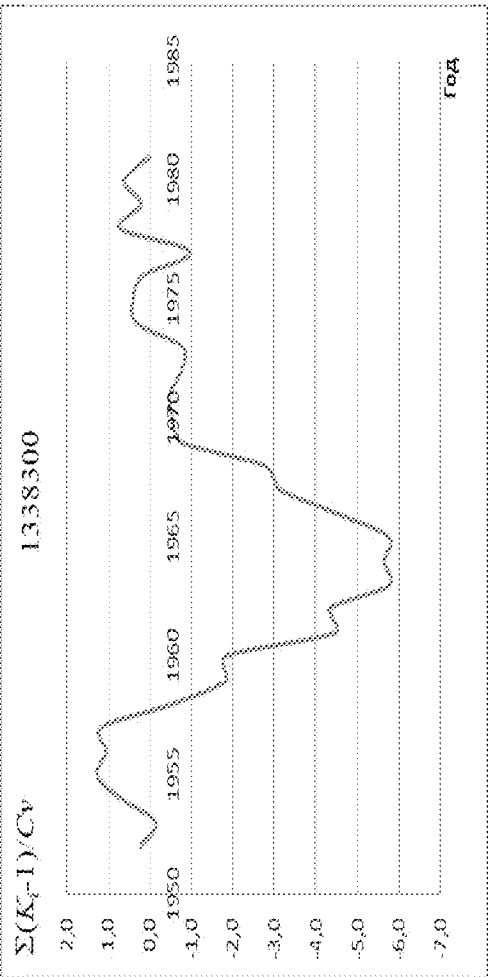
am')



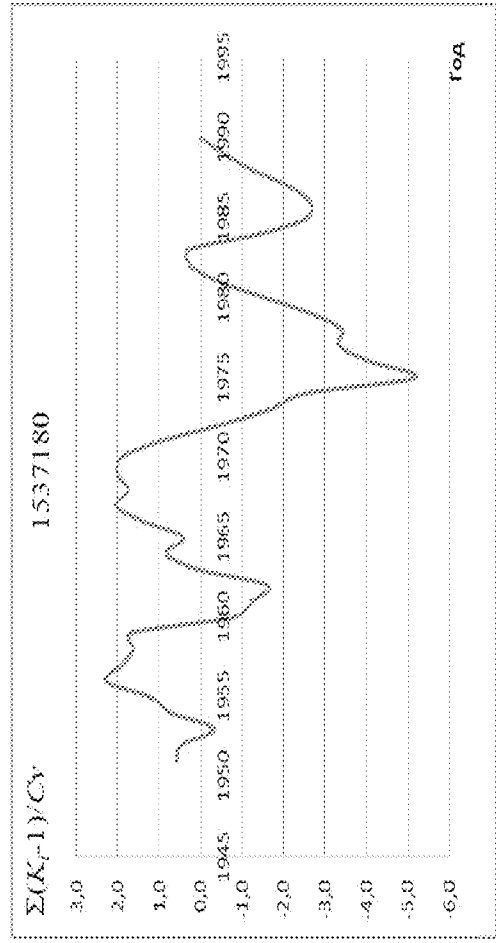
$\alpha\gamma'$



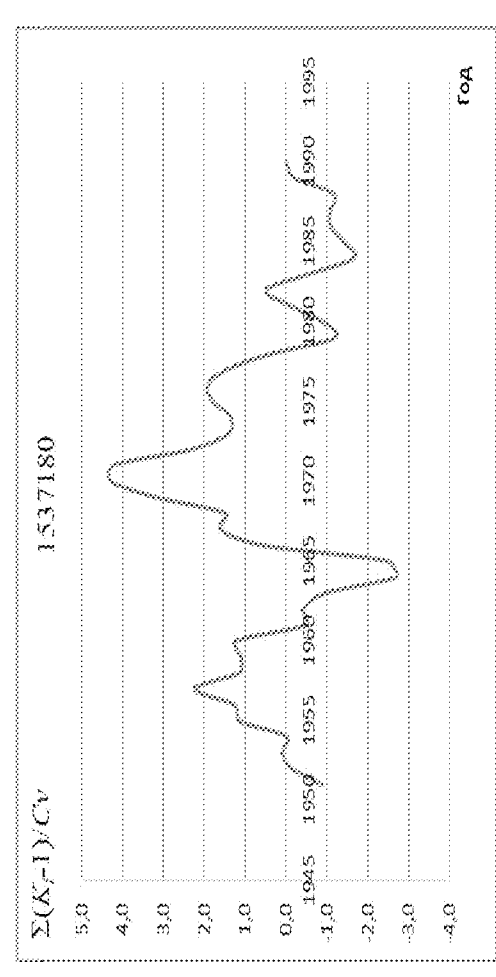
$\alpha\phi$



$\alpha\gamma'$

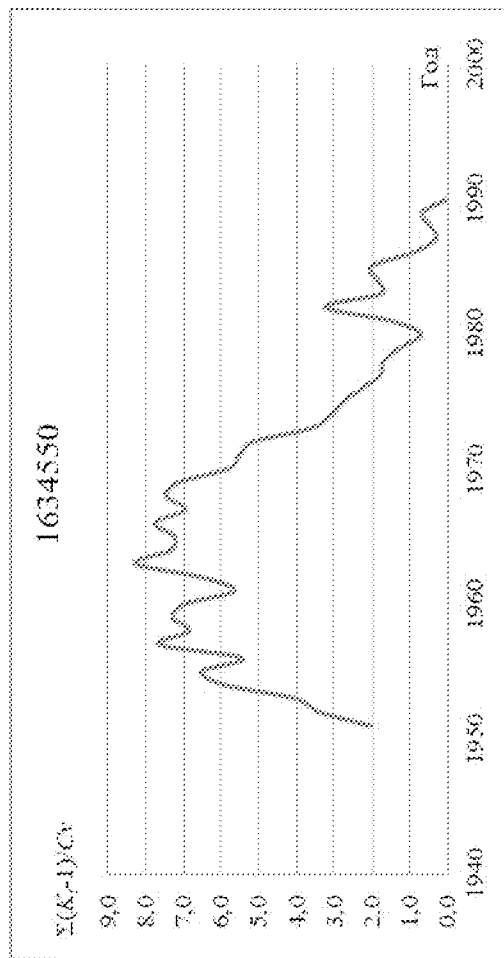
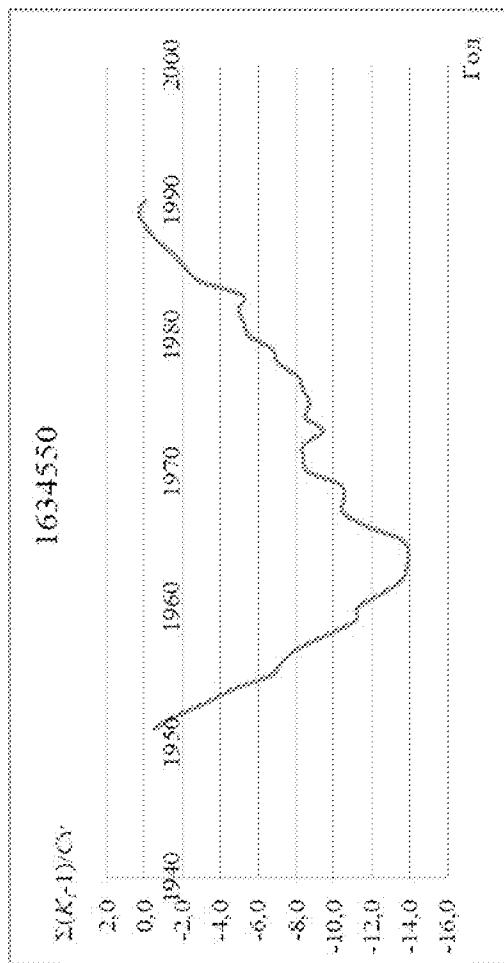


$\alpha\phi'$

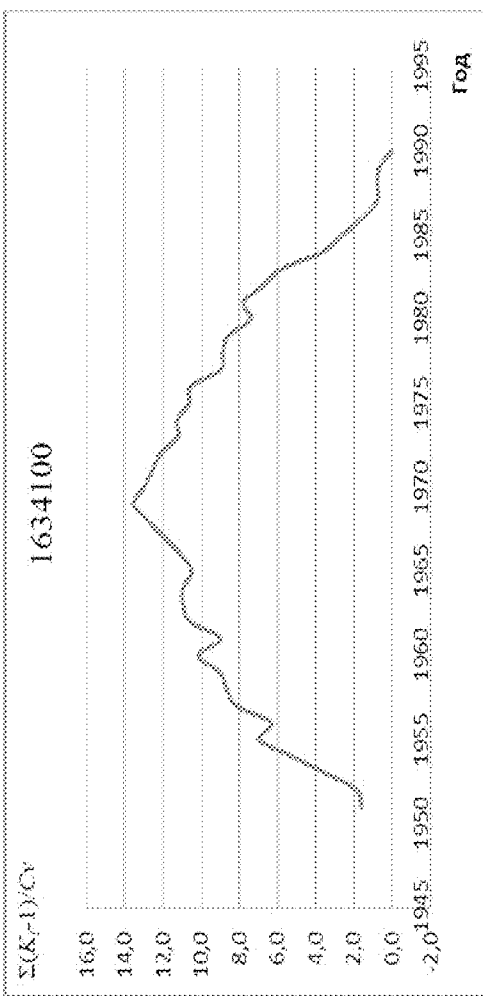
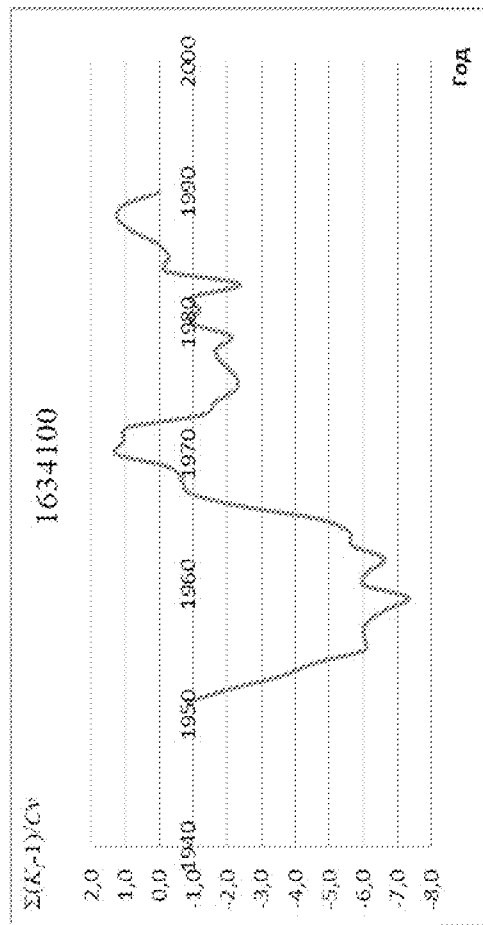


ПРИЛОЖЕНИЕ В – Разностно-интегральные кривые температуры и осадков

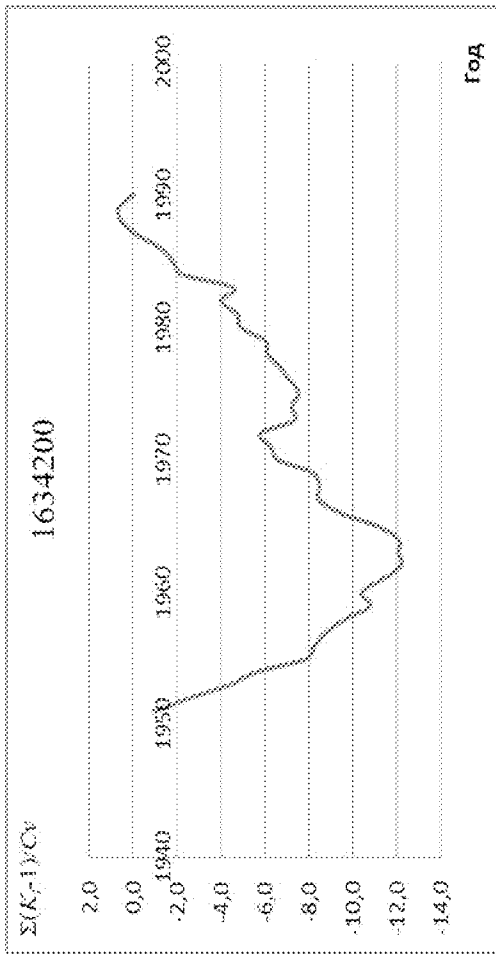
а)



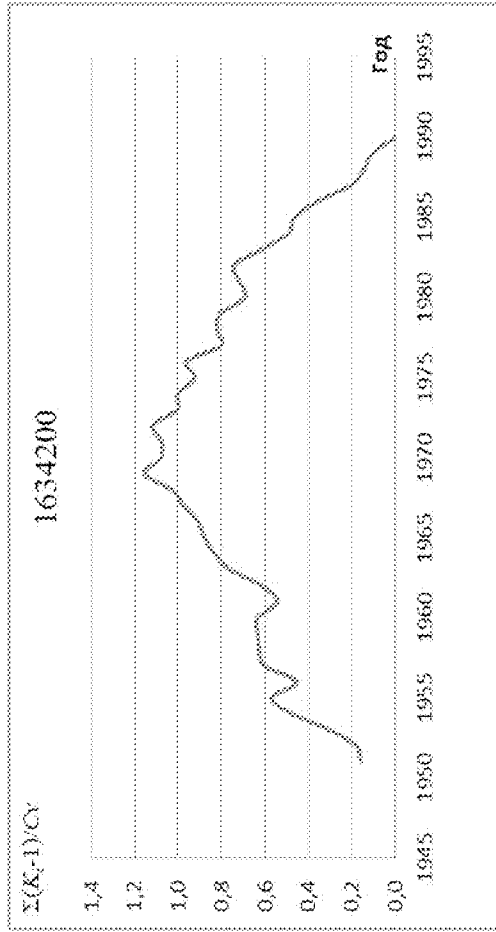
б)



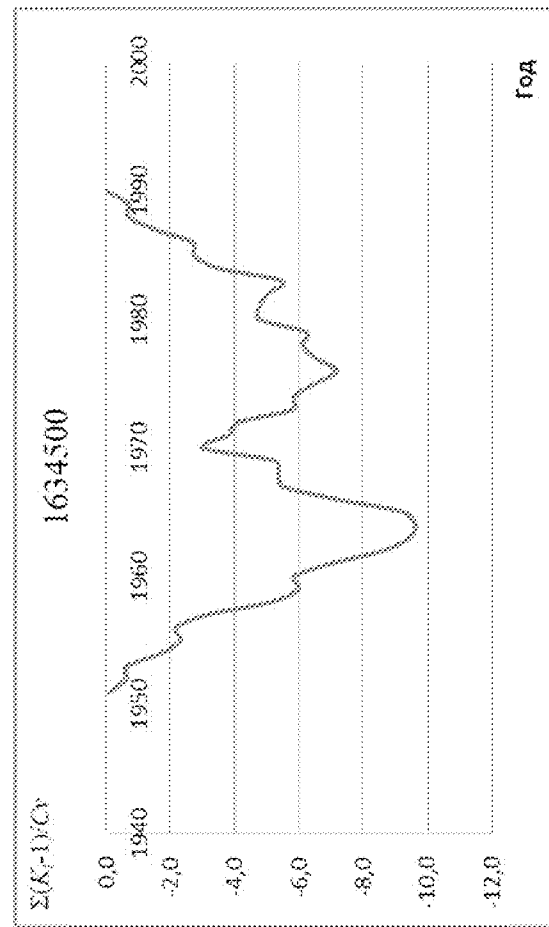
6)



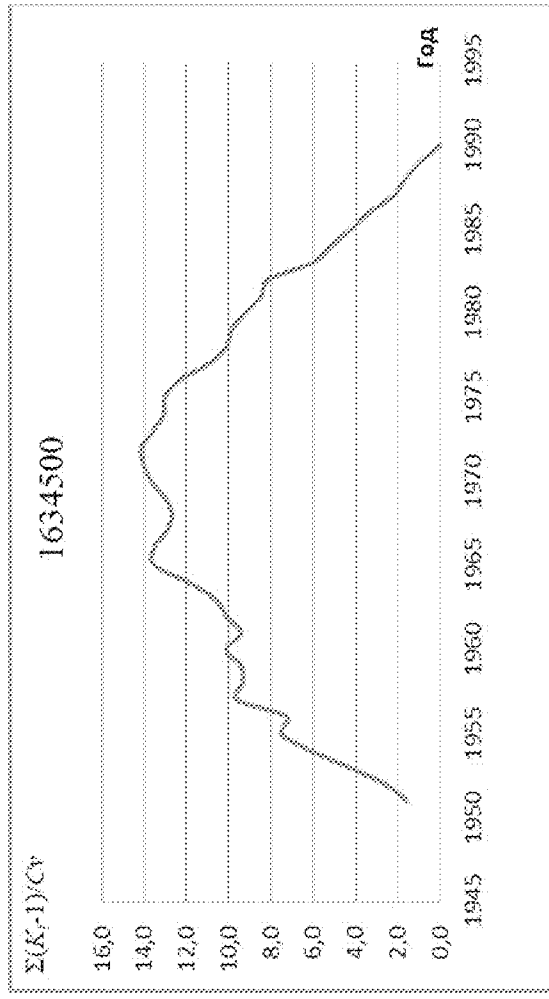
6')



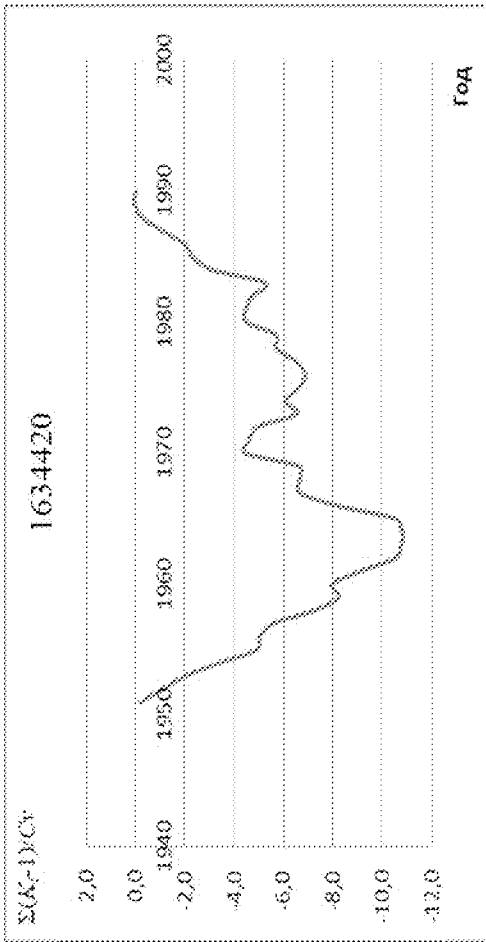
2)



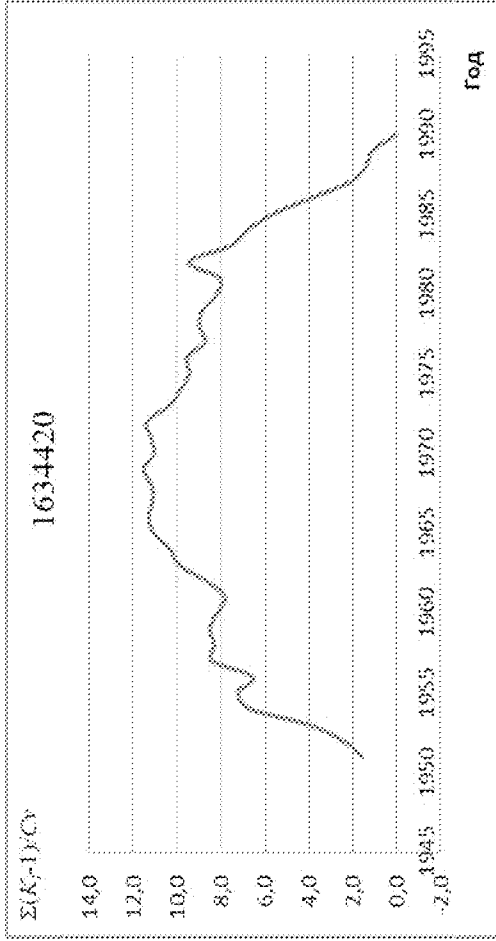
2')



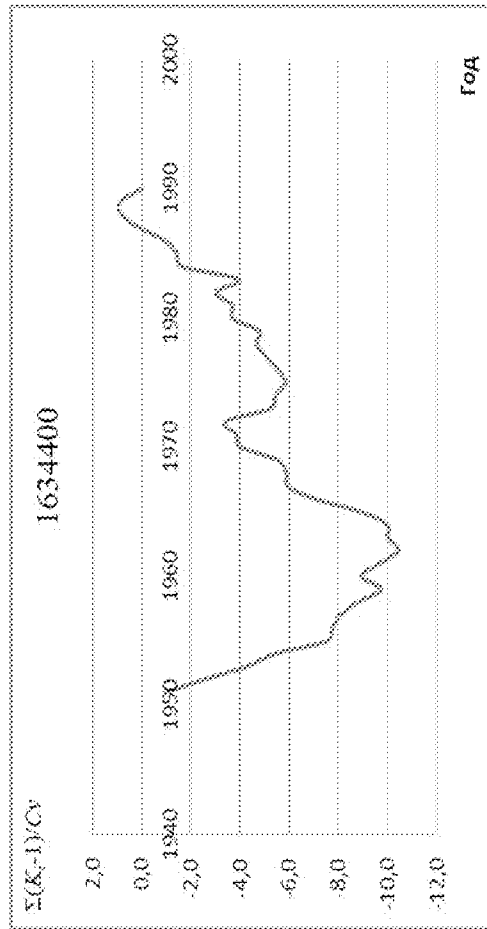
d)



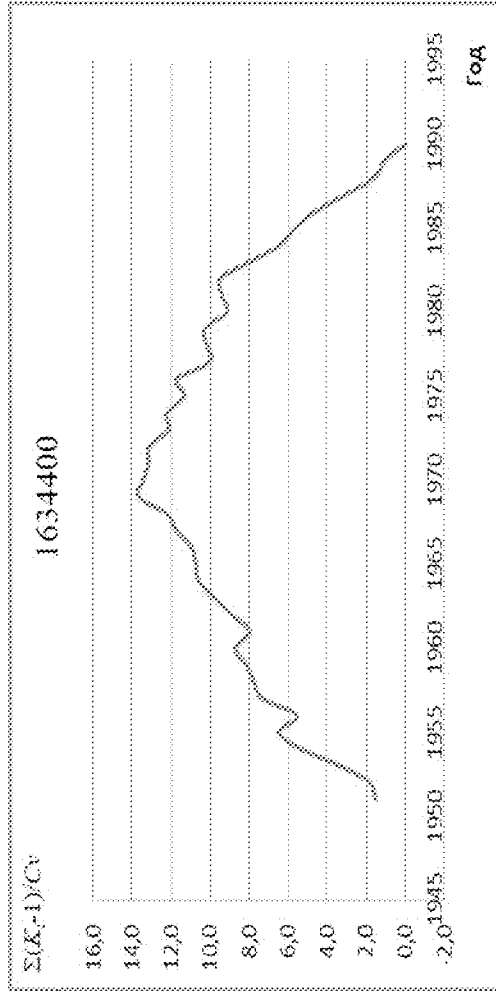
d')



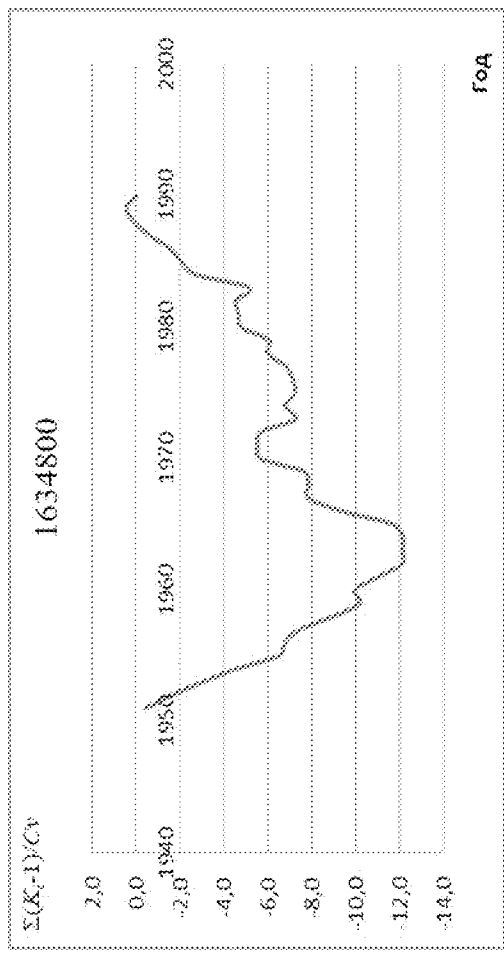
e)



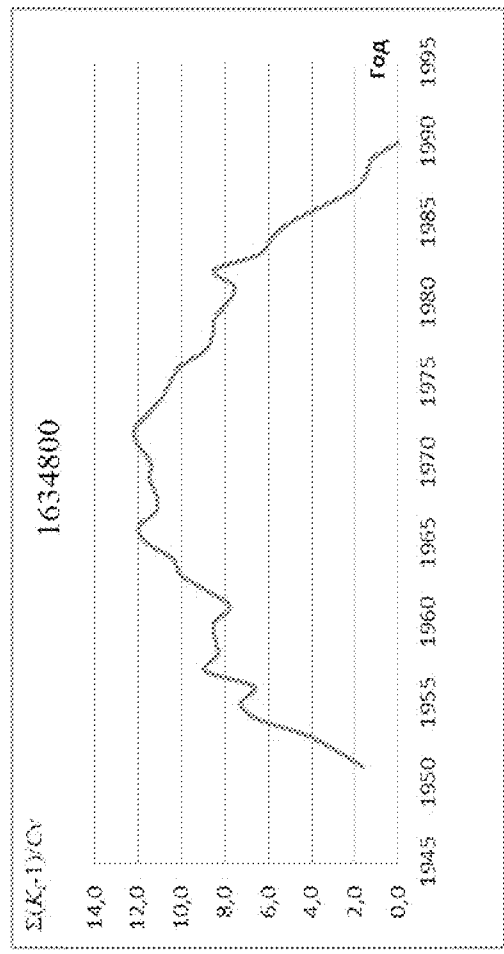
e')



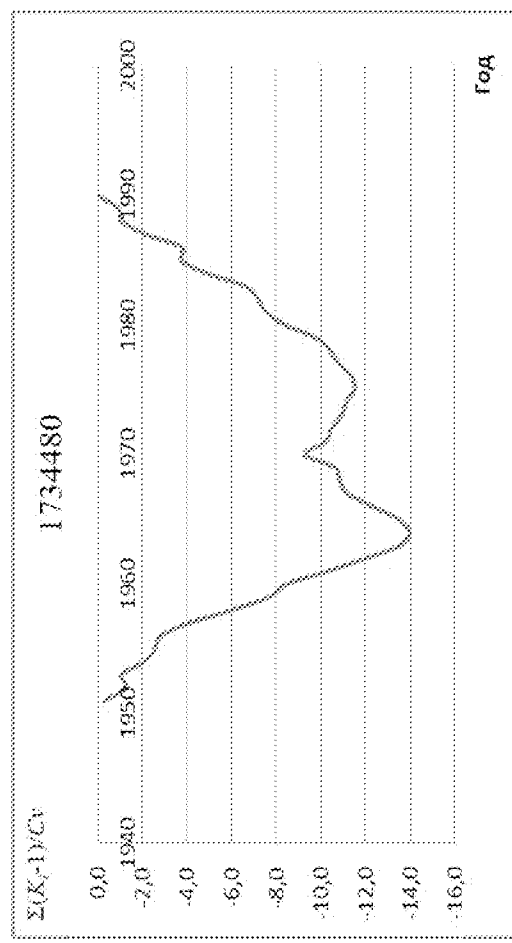
$\partial C'$



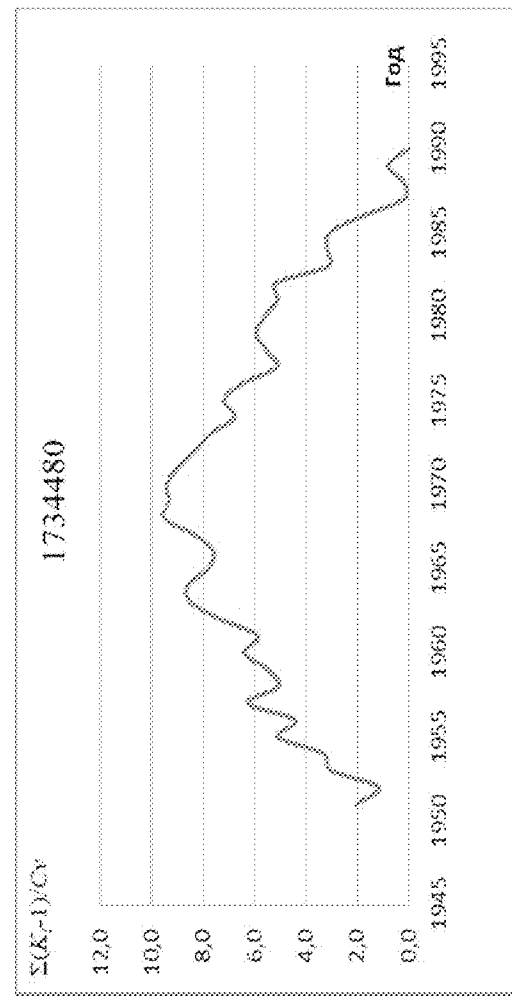
∂C



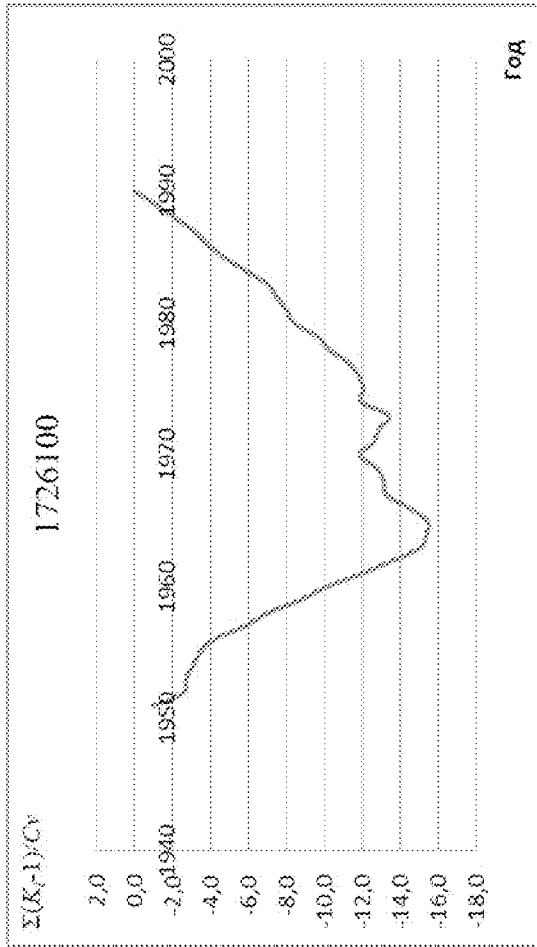
u'



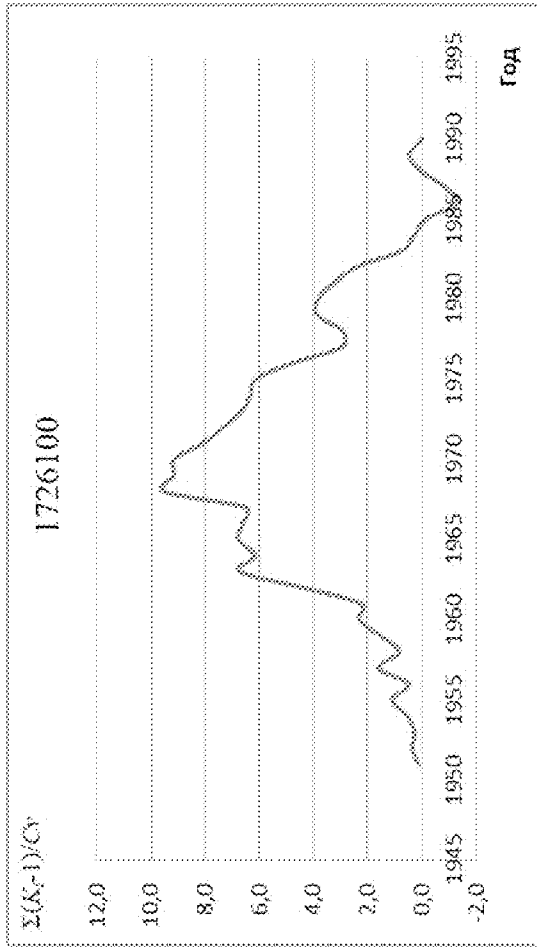
u



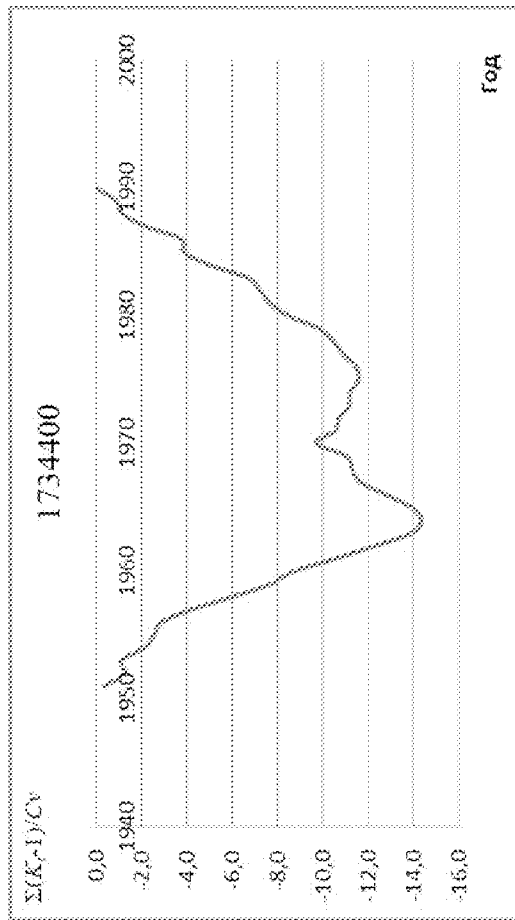
κ)



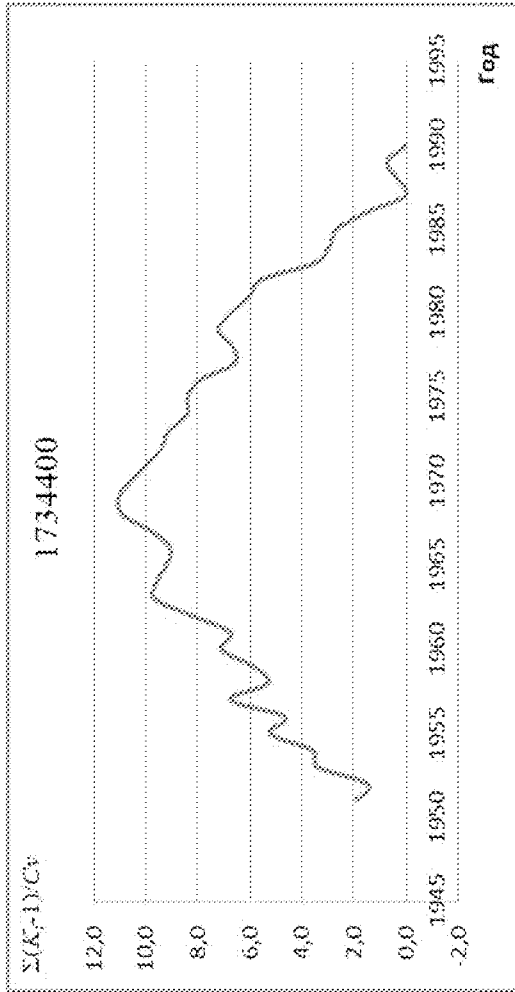
κ)



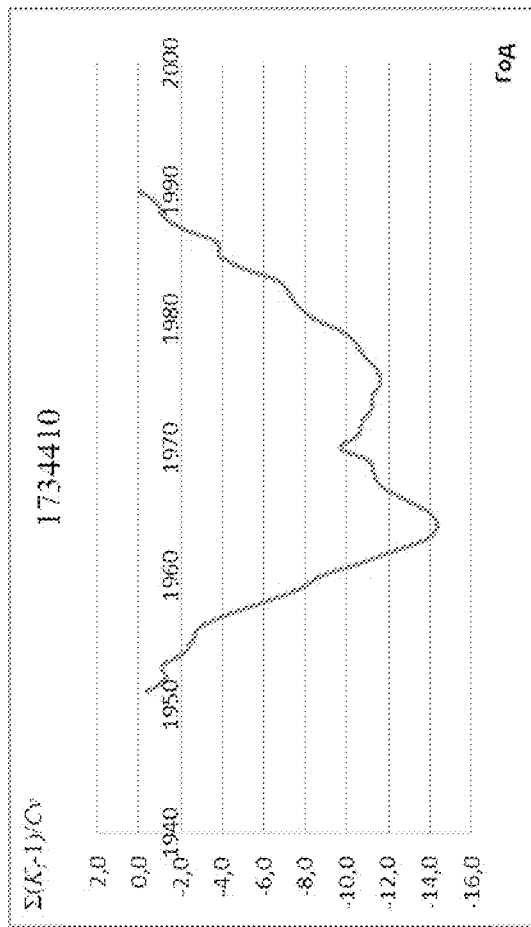
π)



π)



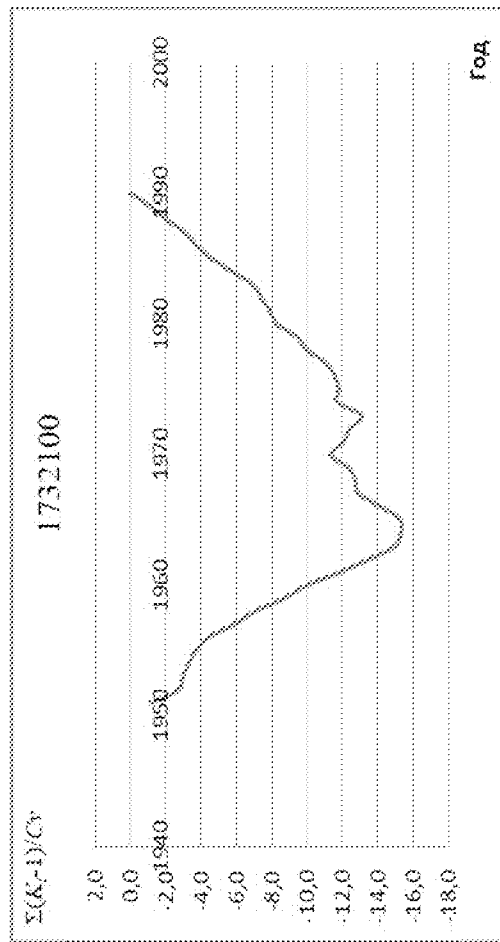
M)



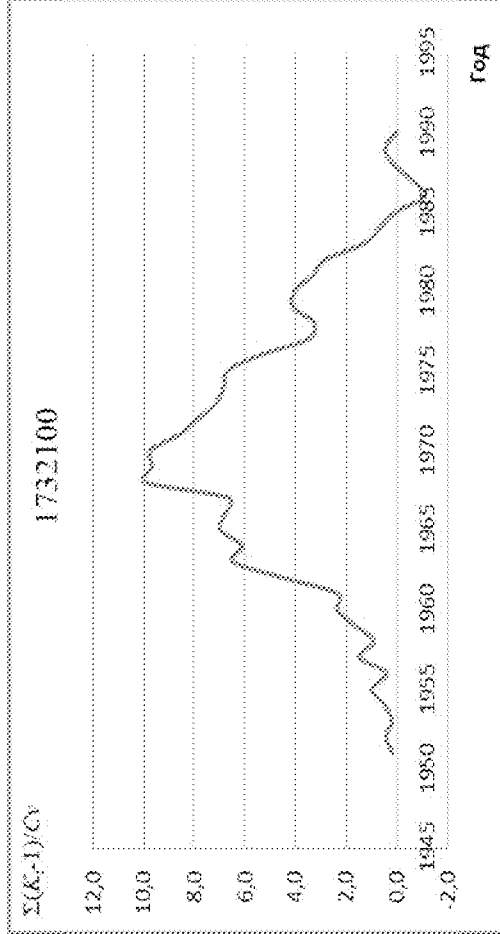
M')



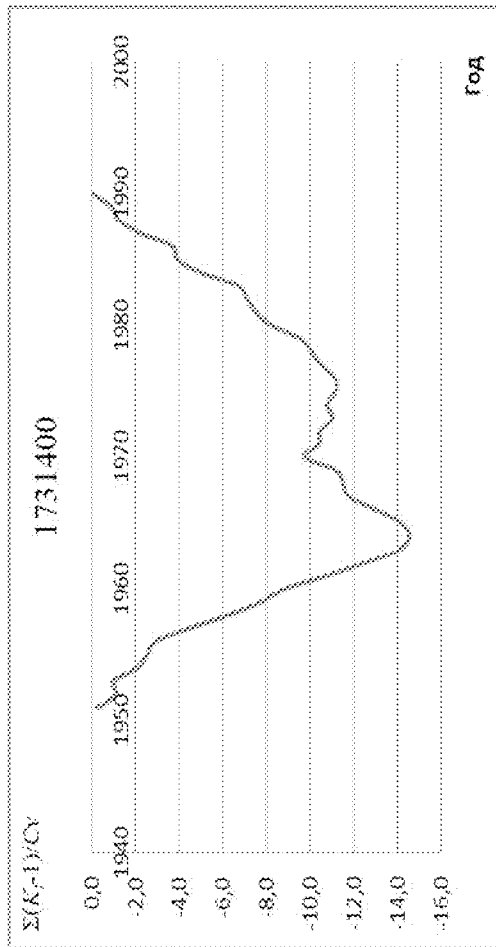
H)



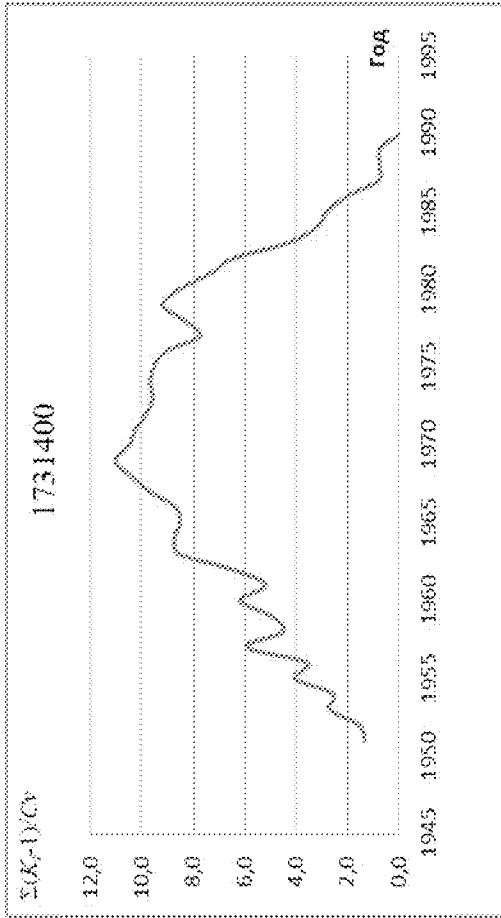
H')



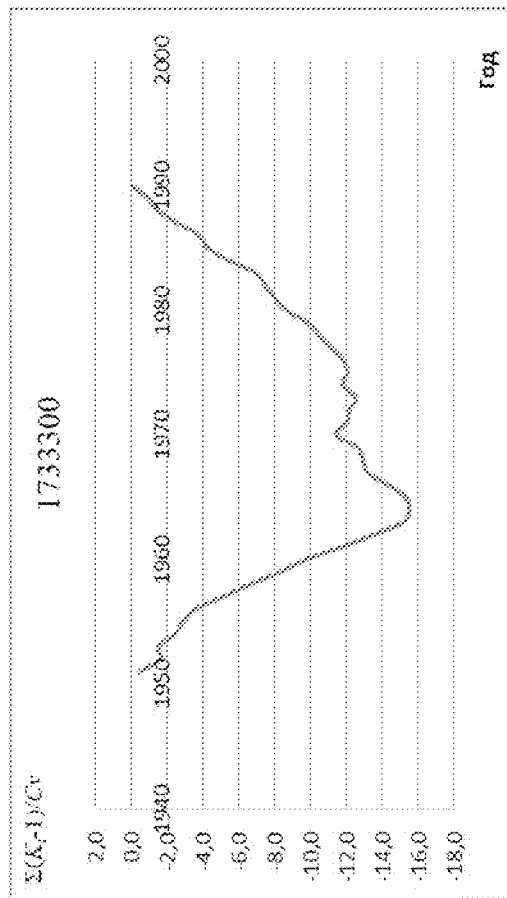
o)



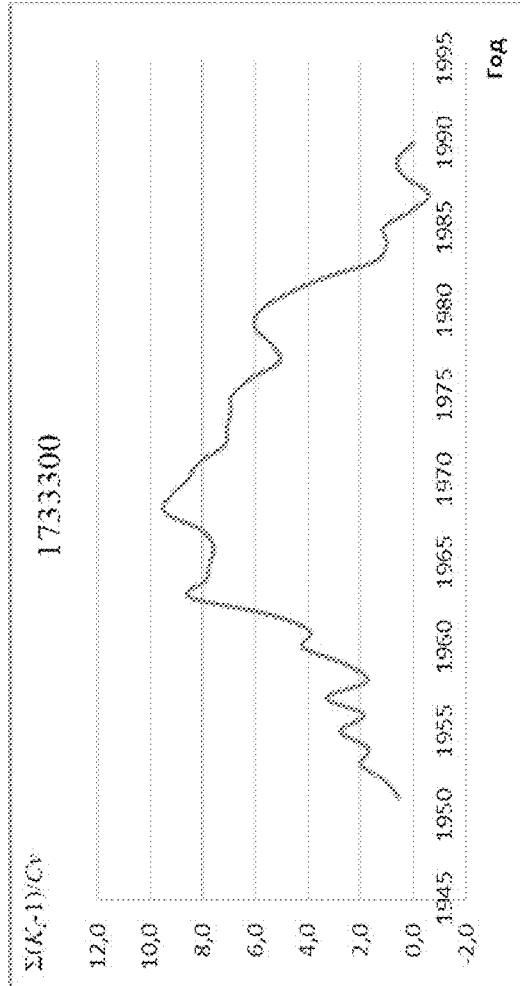
o')



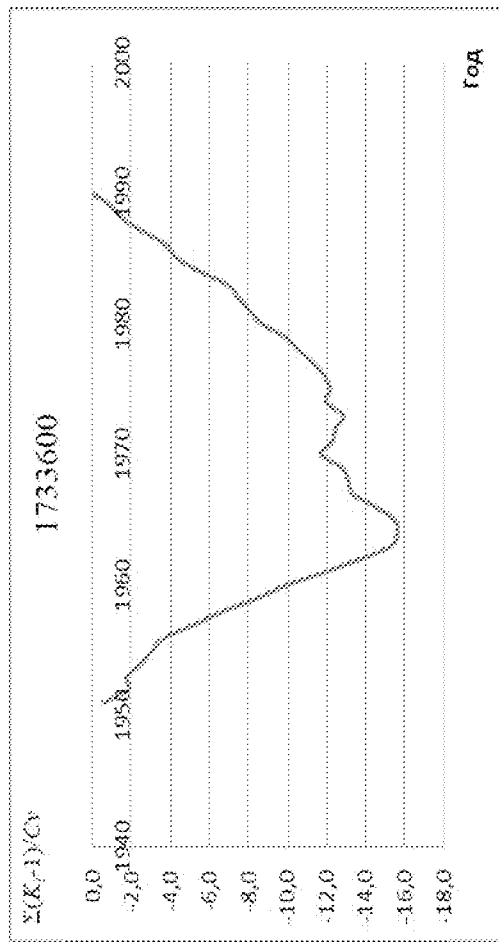
n)



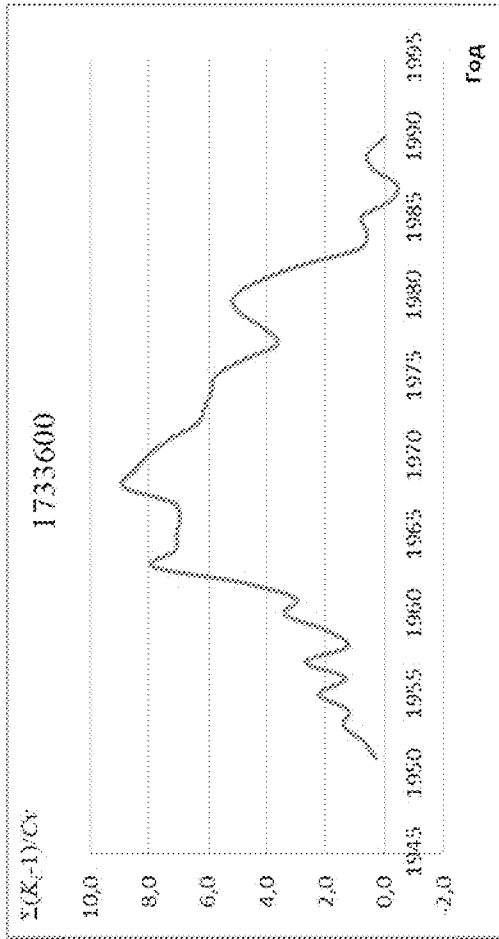
n')



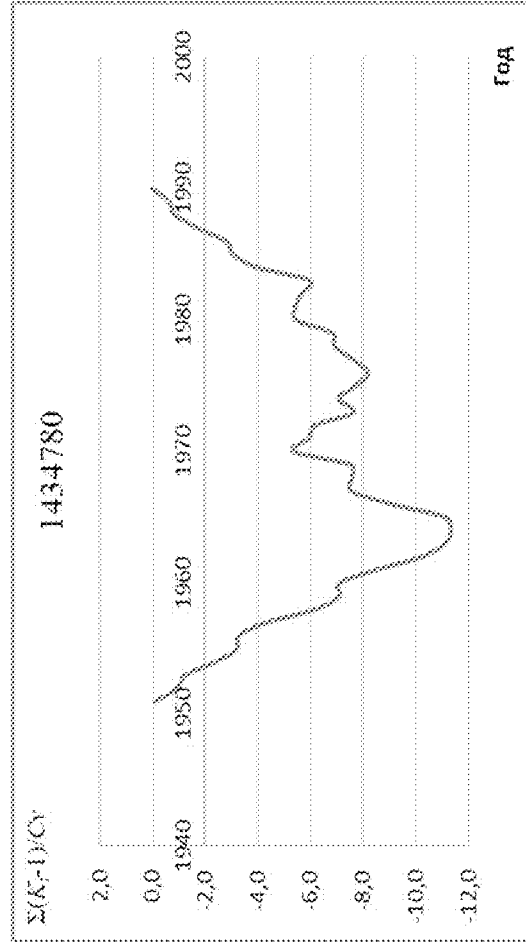
p)



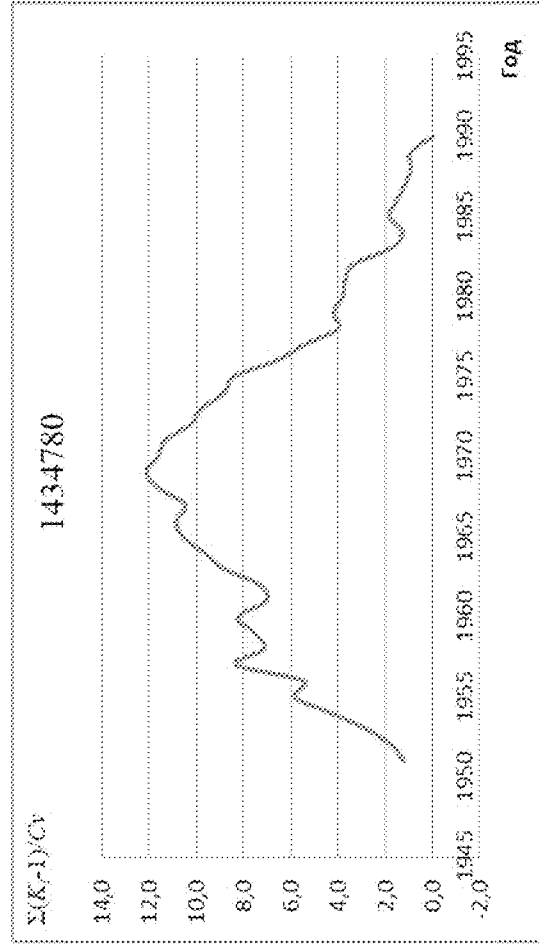
p')



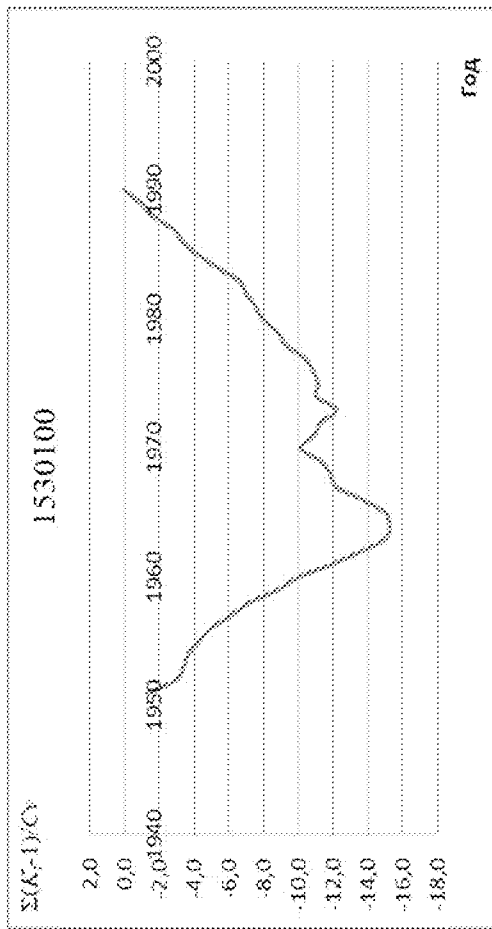
c)



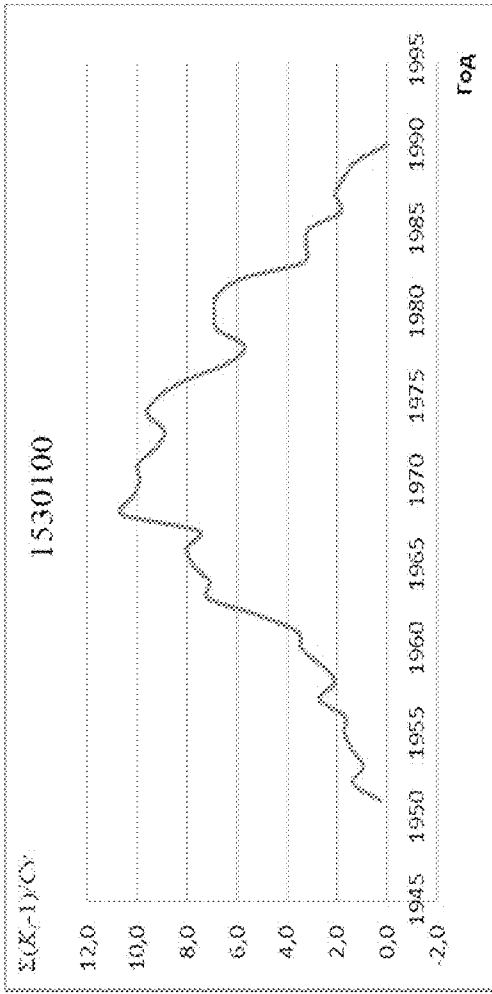
c')



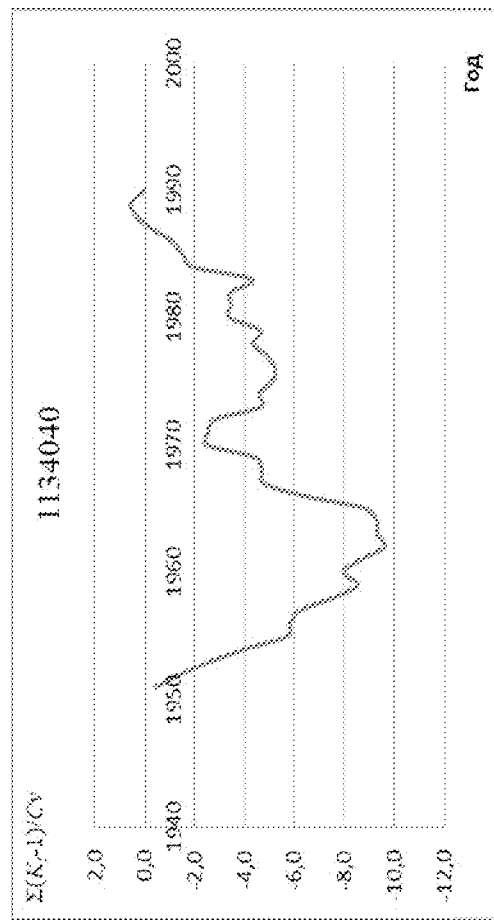
m)



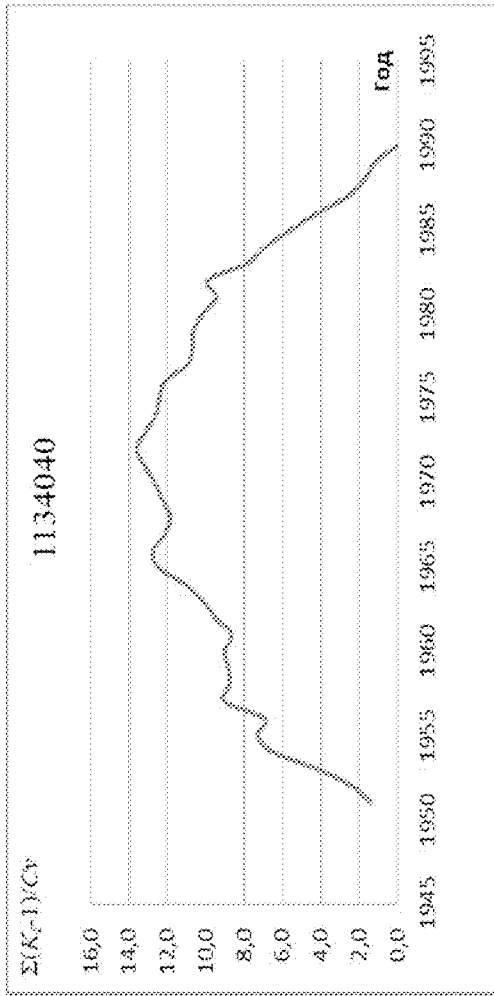
m')



y)



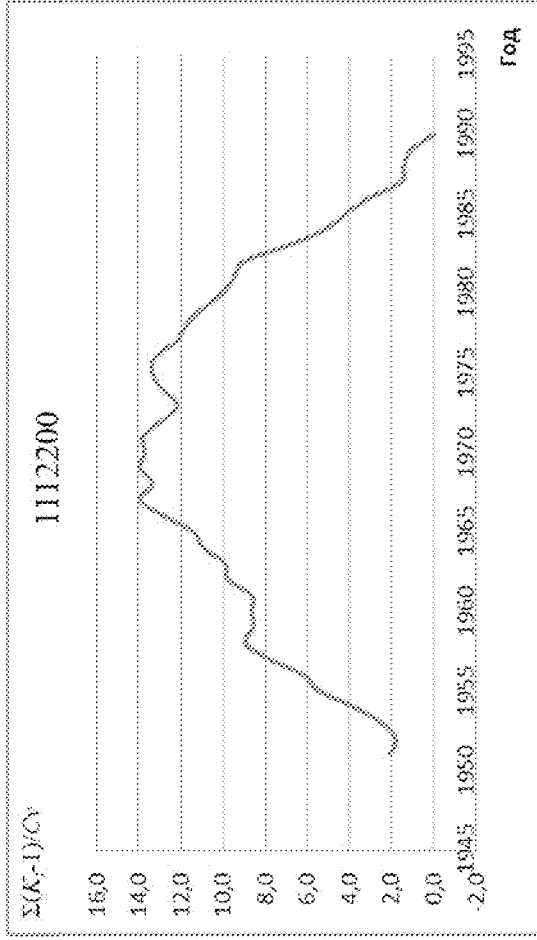
y')



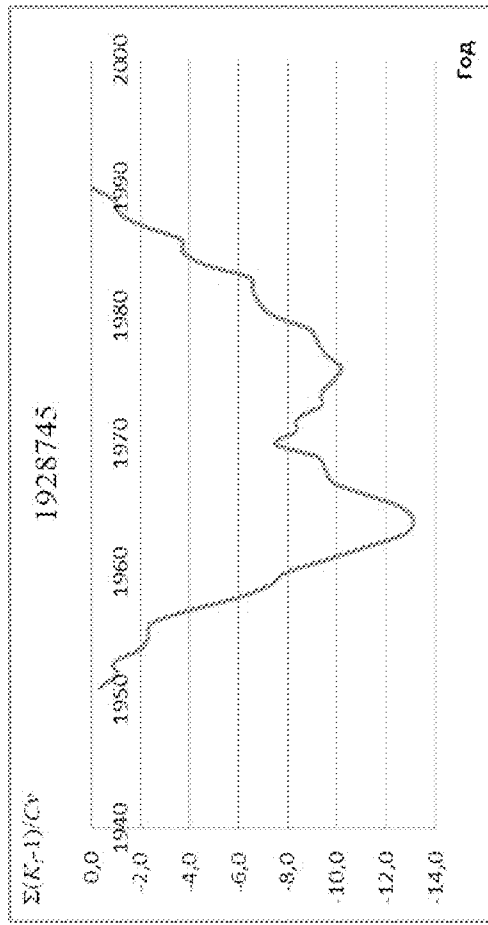
ϕ)



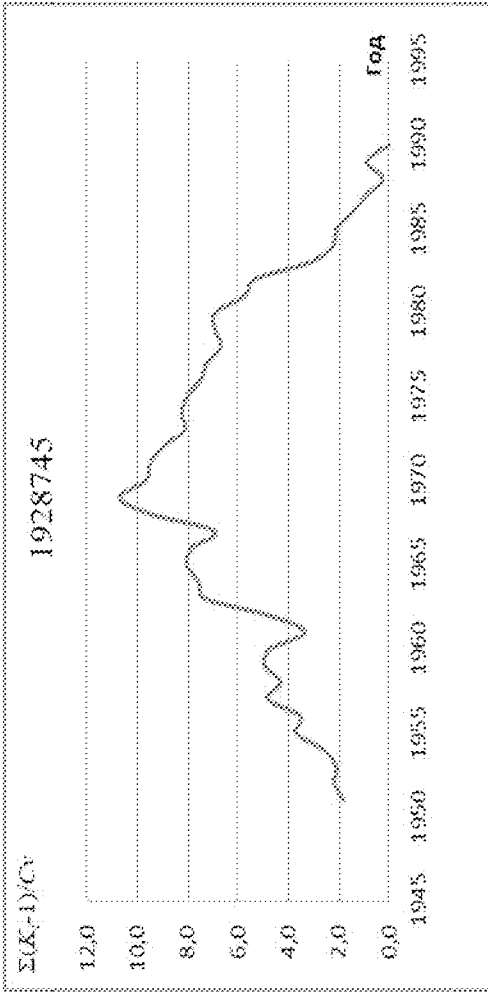
ϕ')



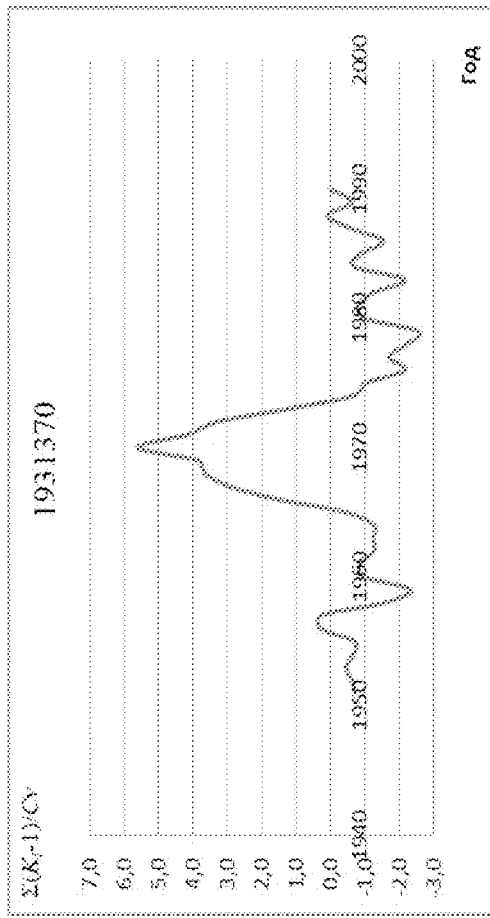
x)



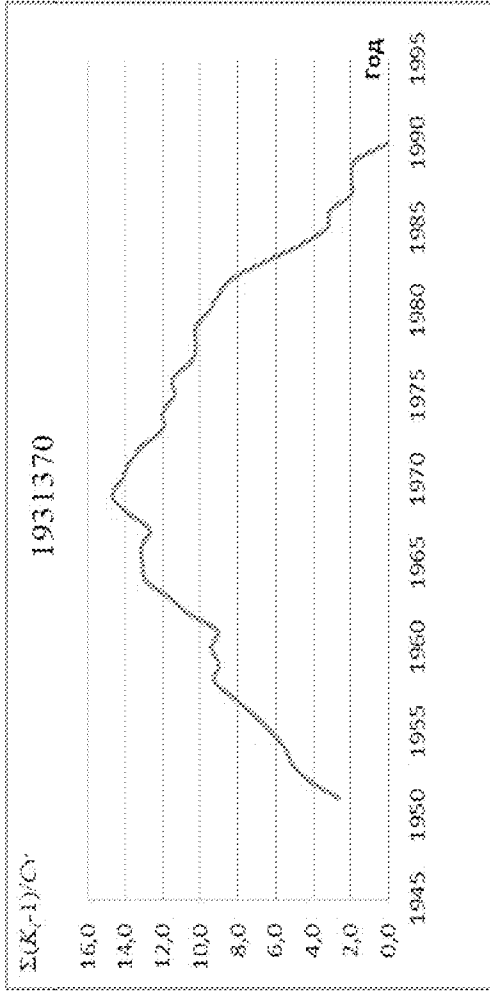
x')



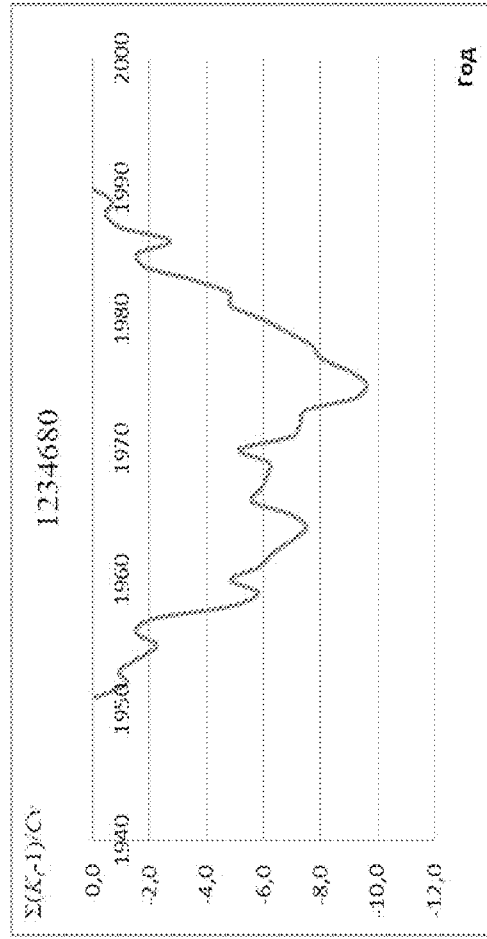
4)



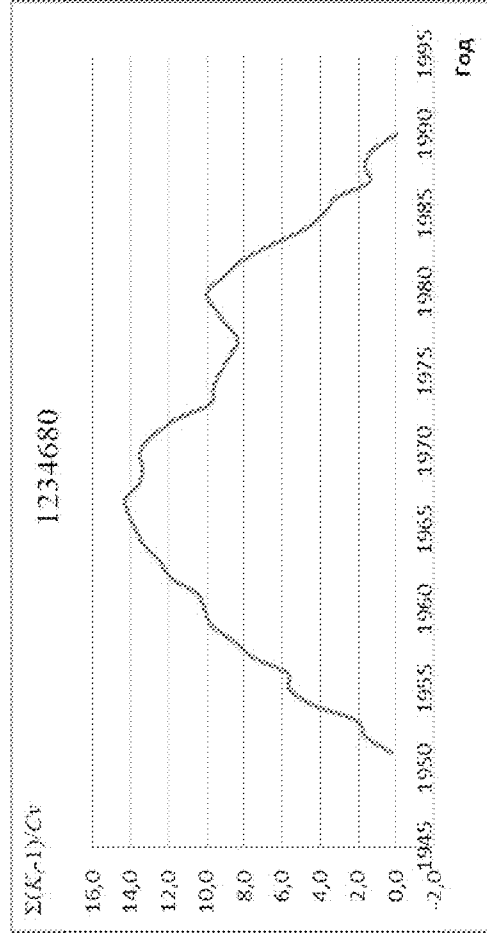
4')



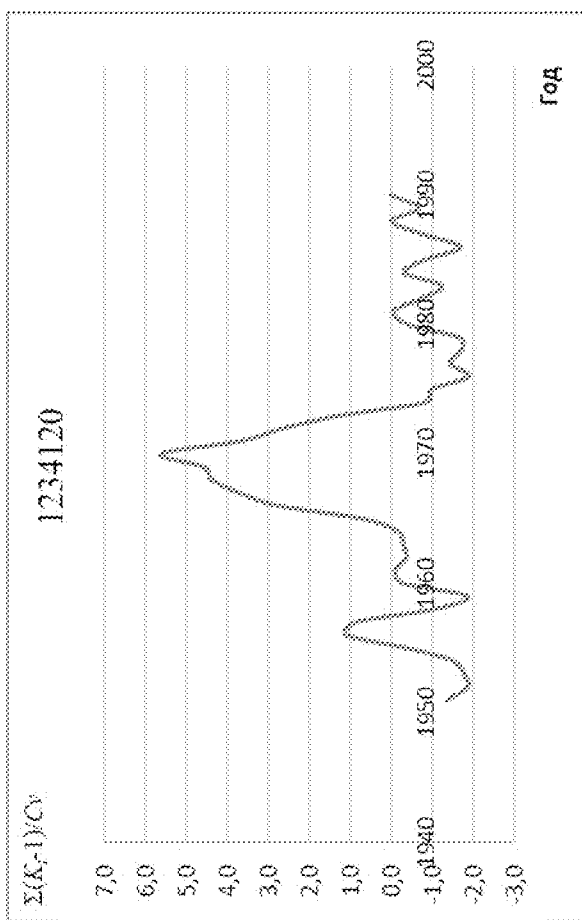
4)



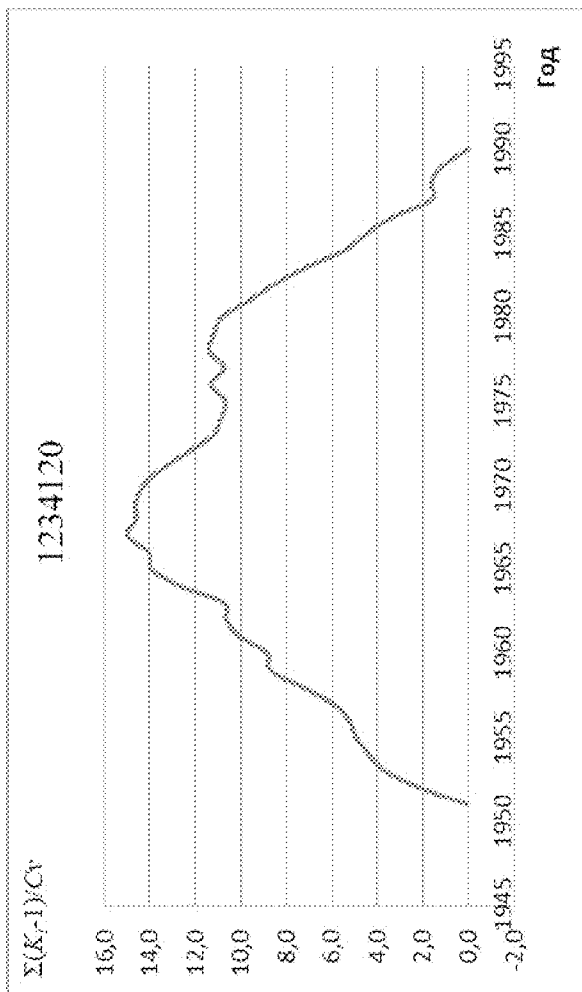
4')



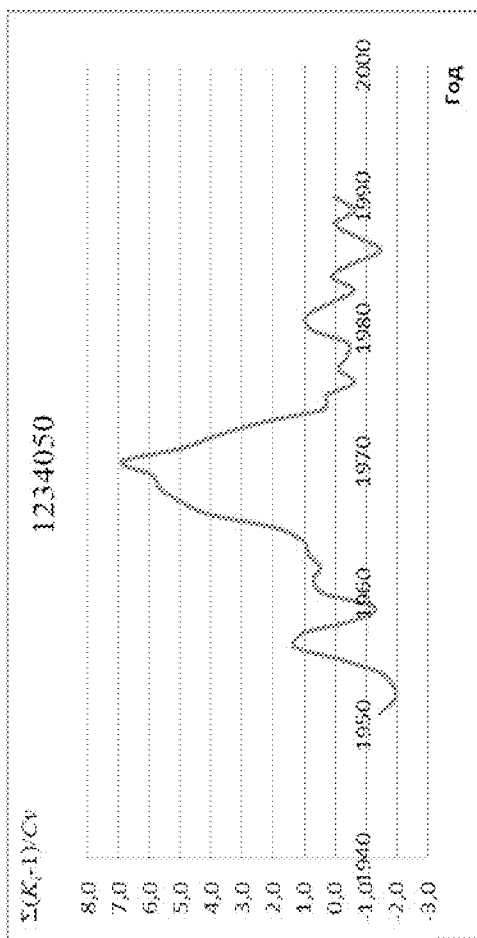
w)



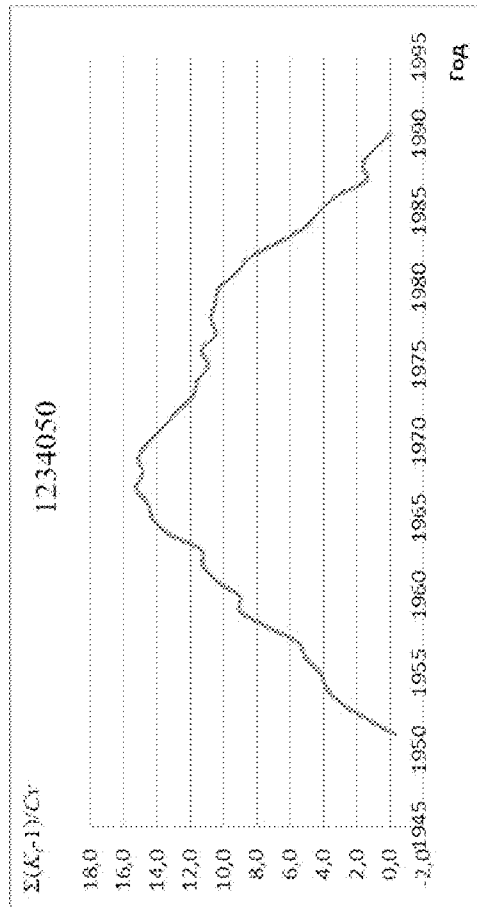
w')



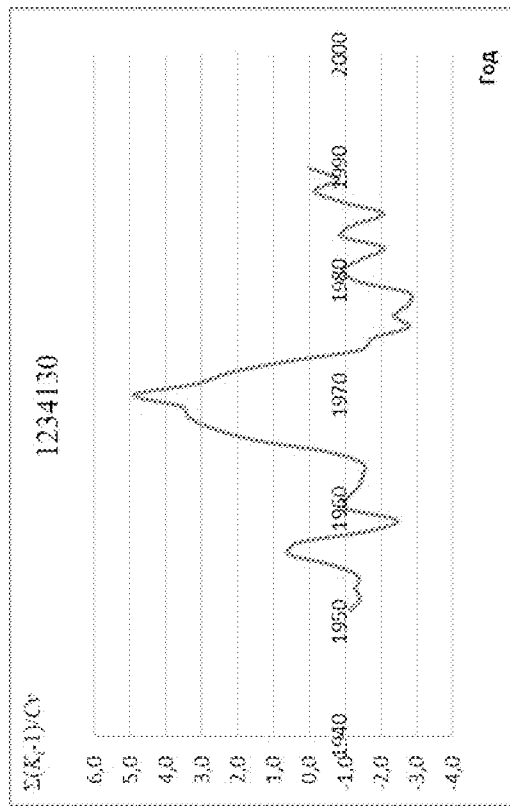
w)



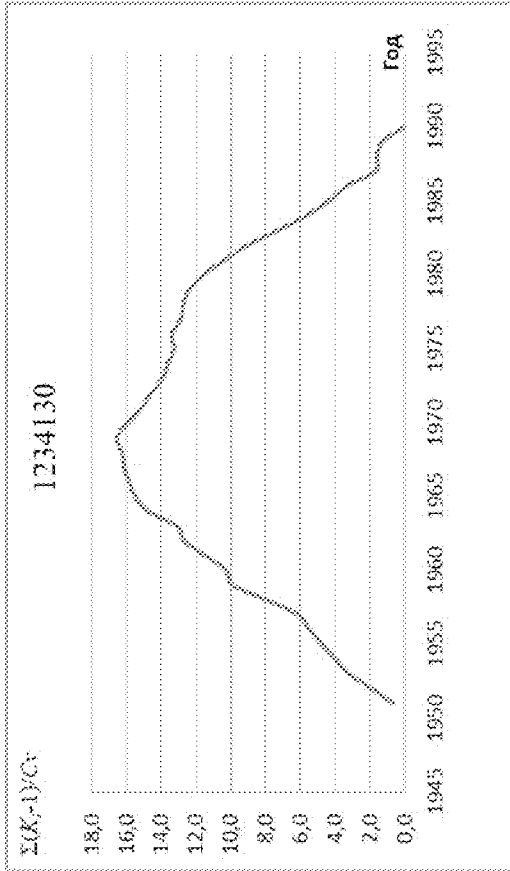
w')



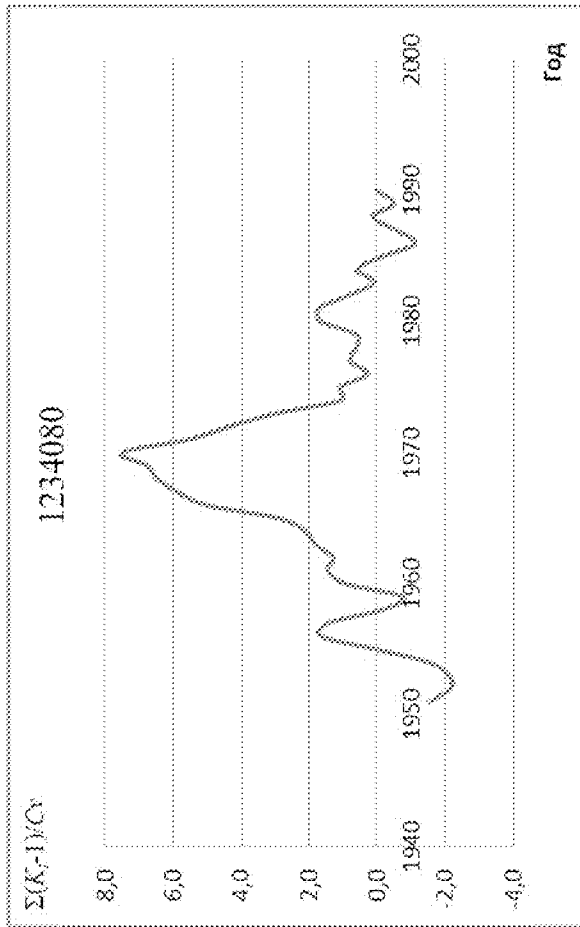
9)



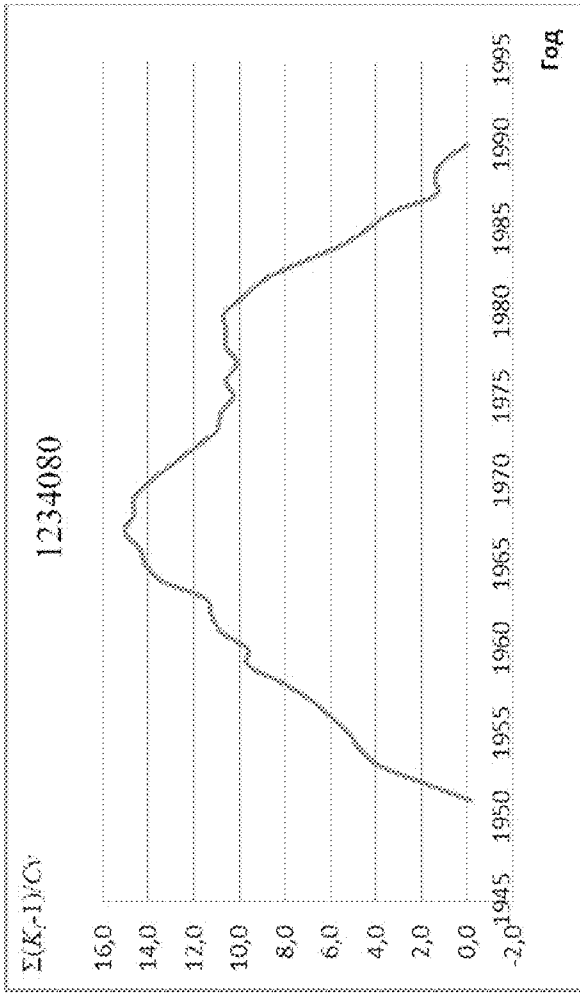
9')



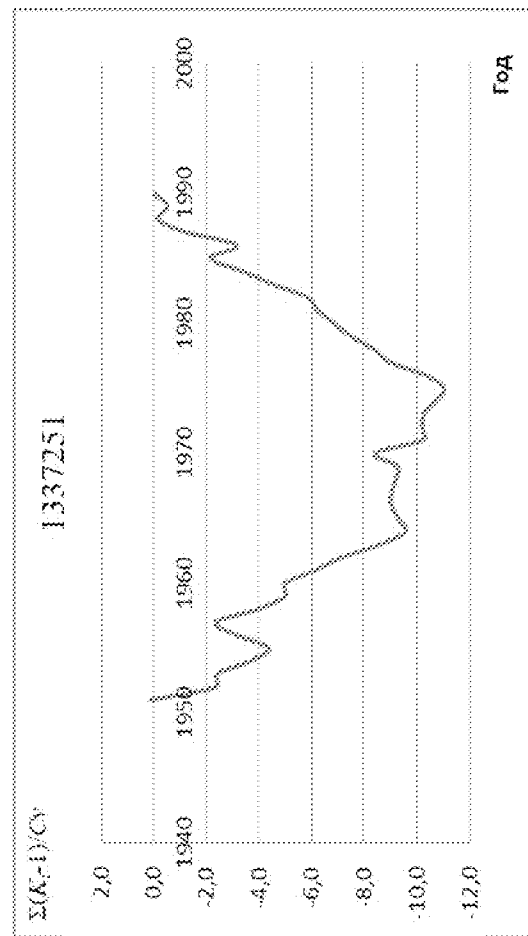
10)



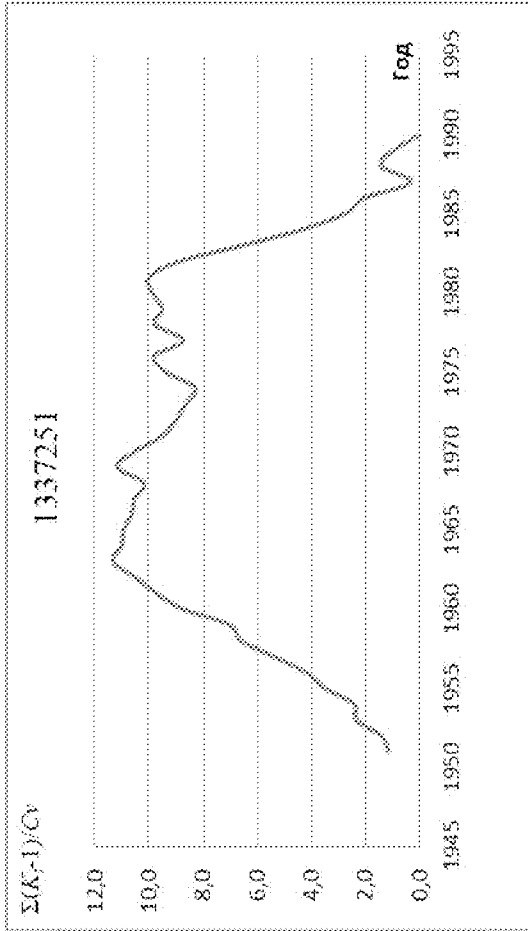
10')



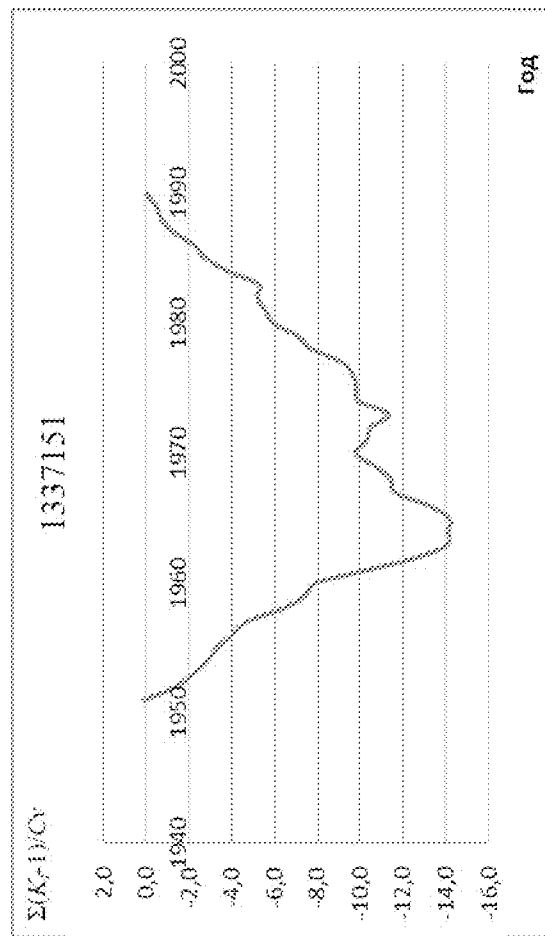
я)



я)



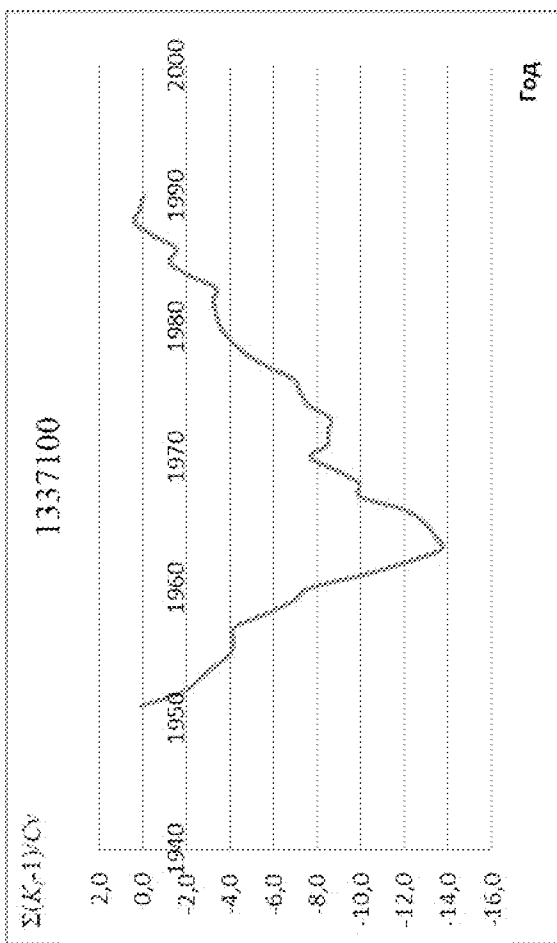
ад)



ад)



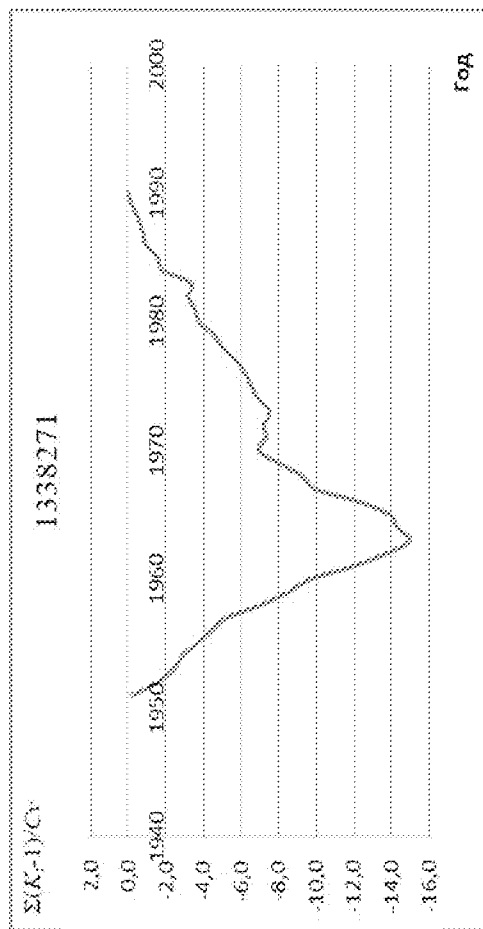
αβ)



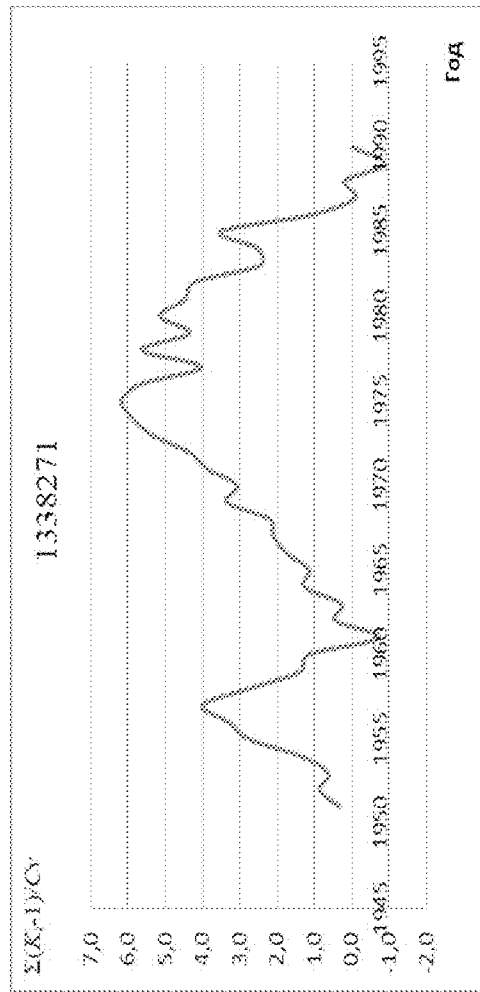
αβ')



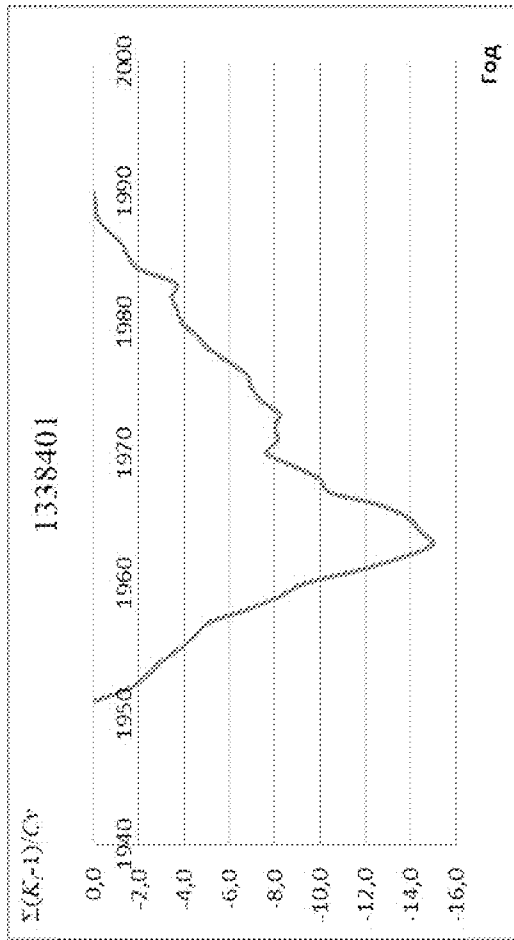
αβ)



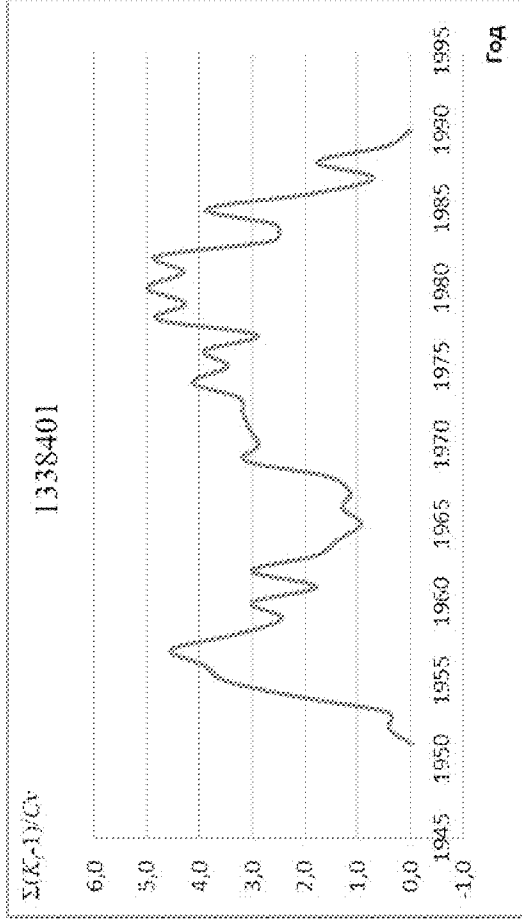
αβ')



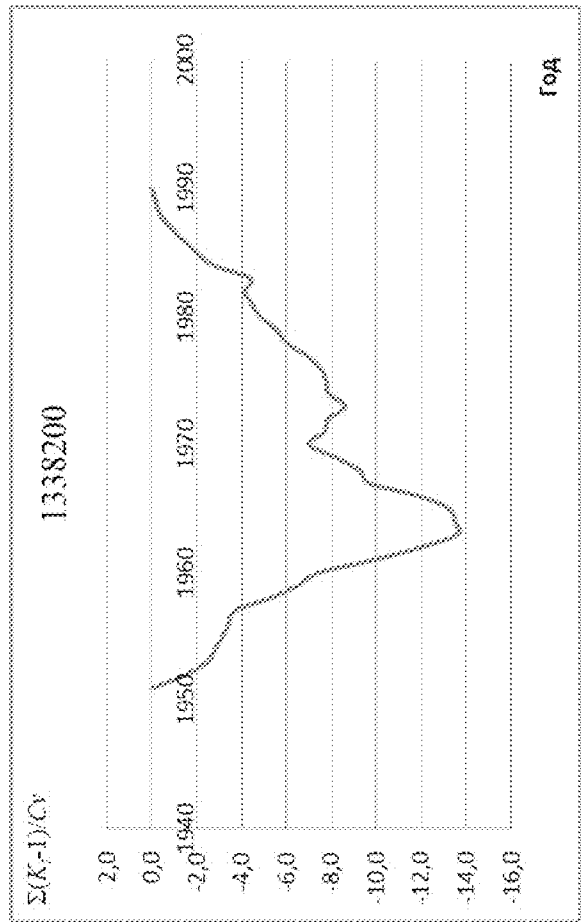
ae)



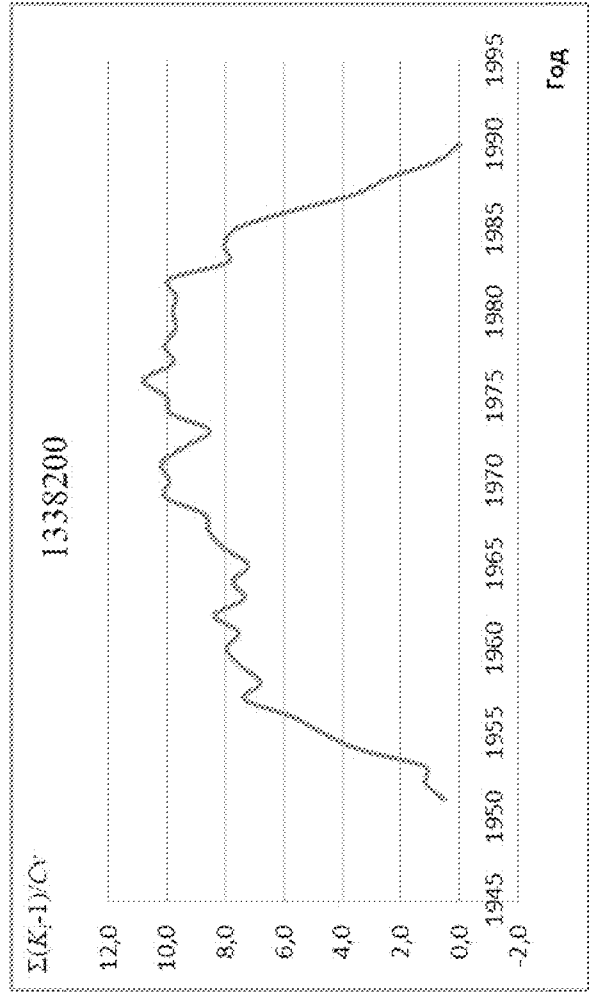
ae')



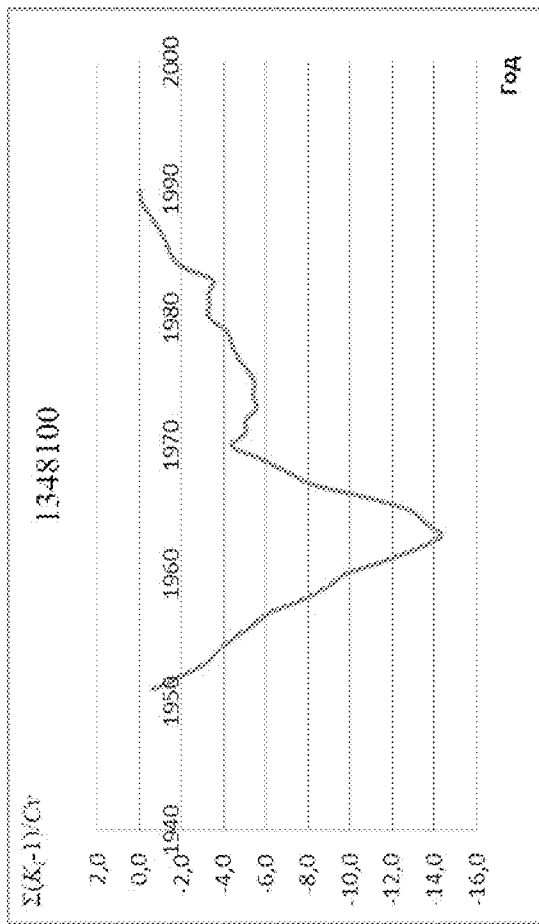
ad)



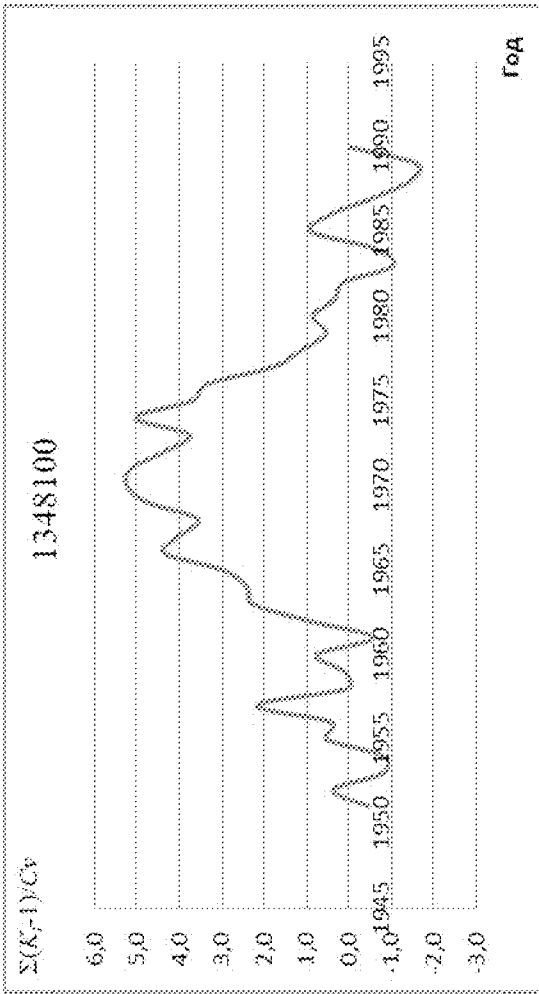
ad')



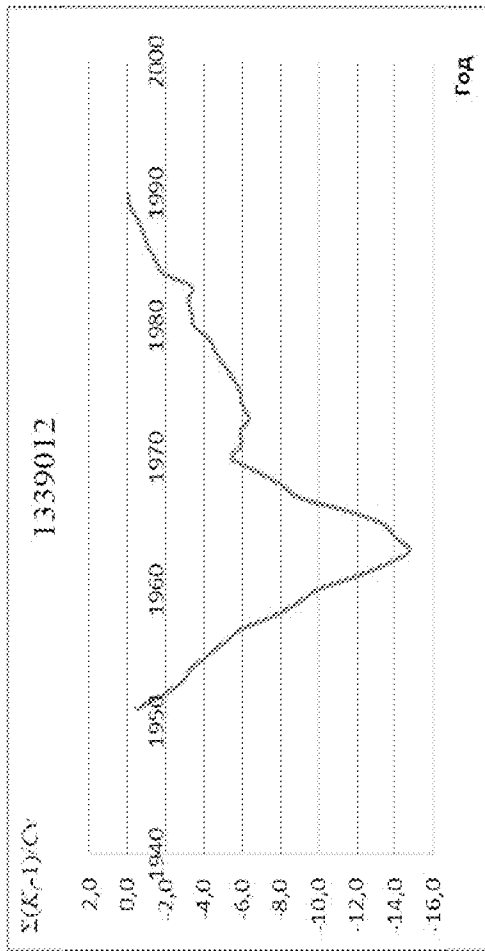
ae)



ae')



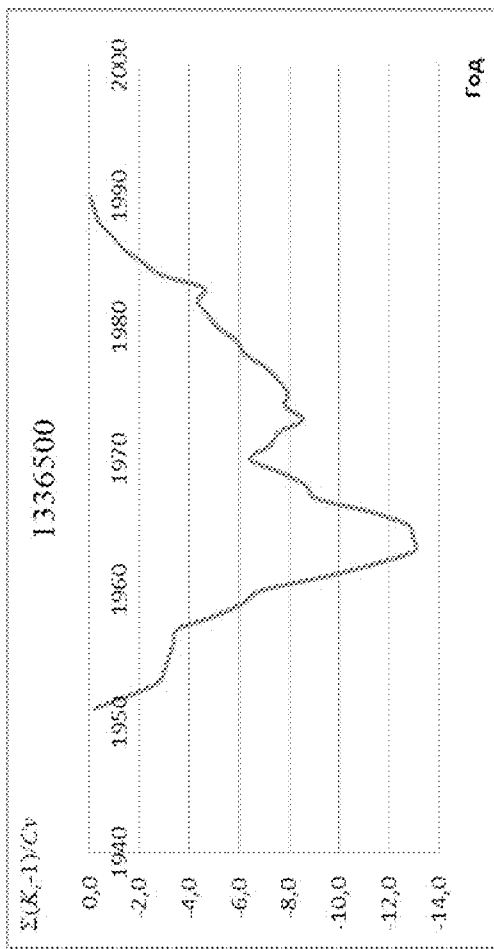
ad/c)



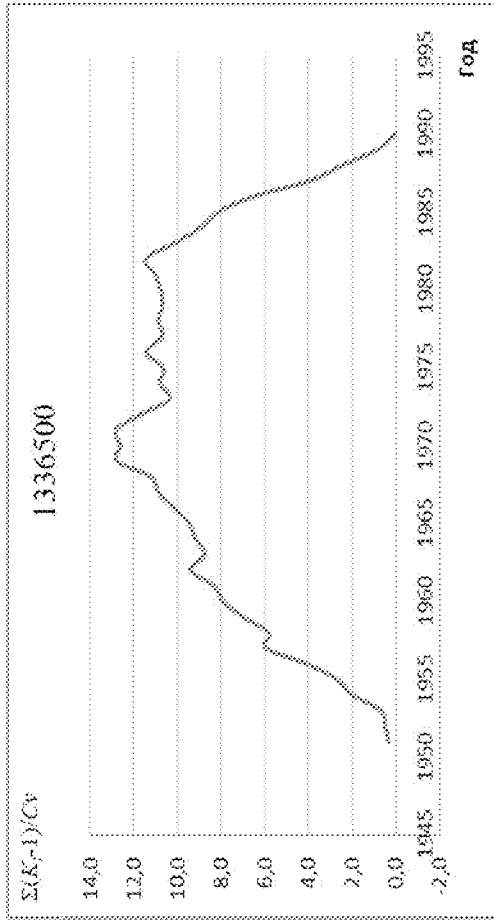
ad/c')



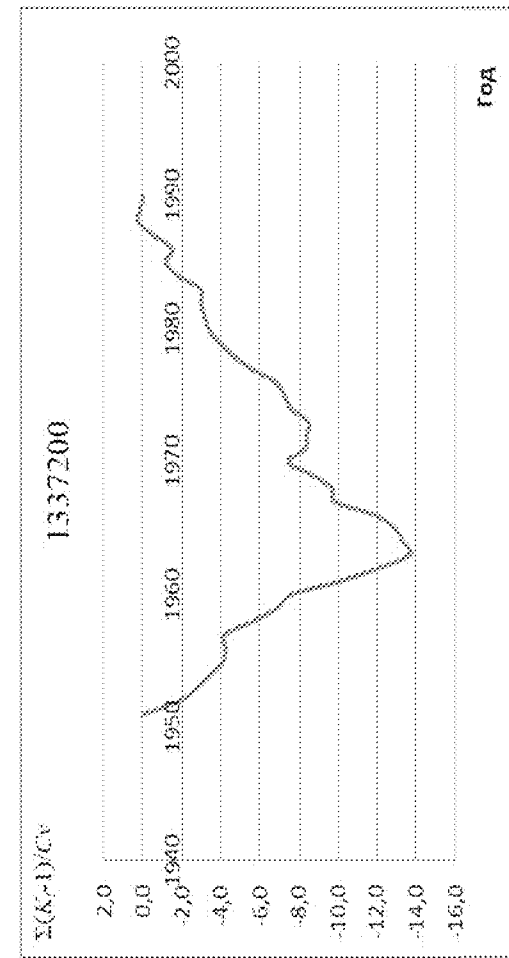
au'



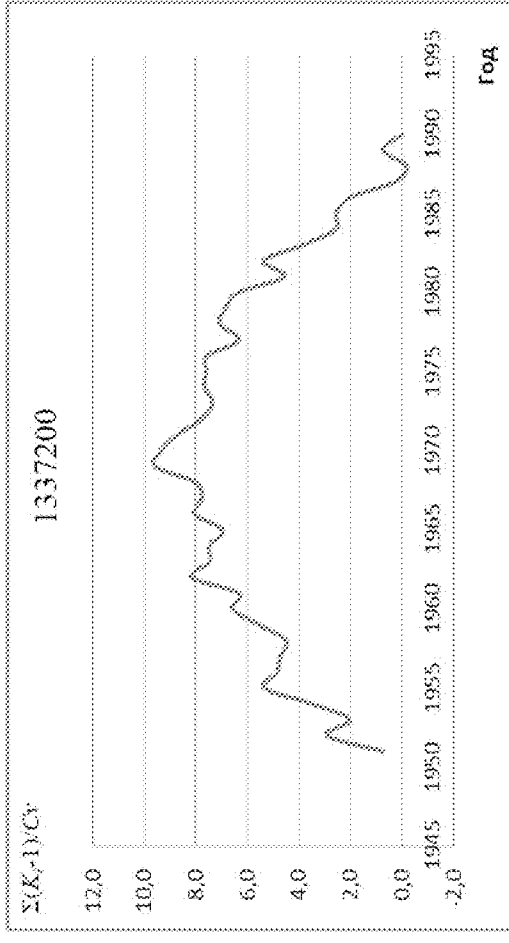
au



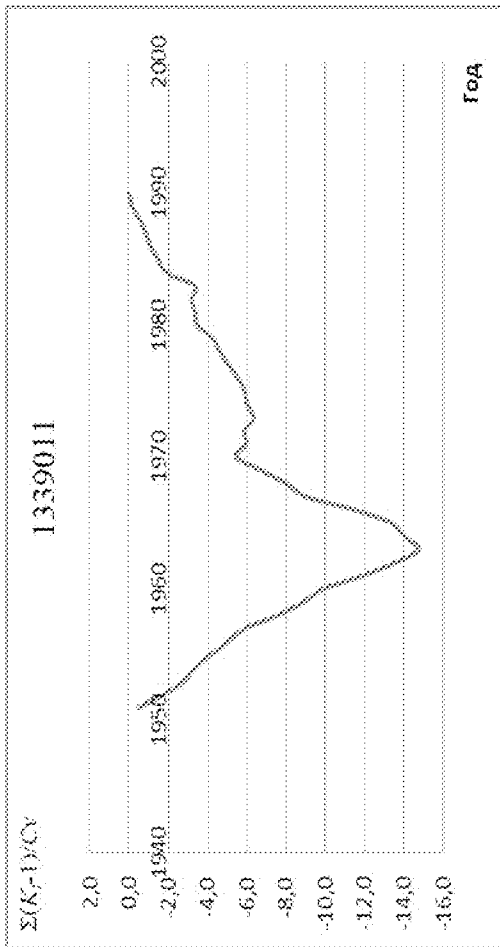
ak'



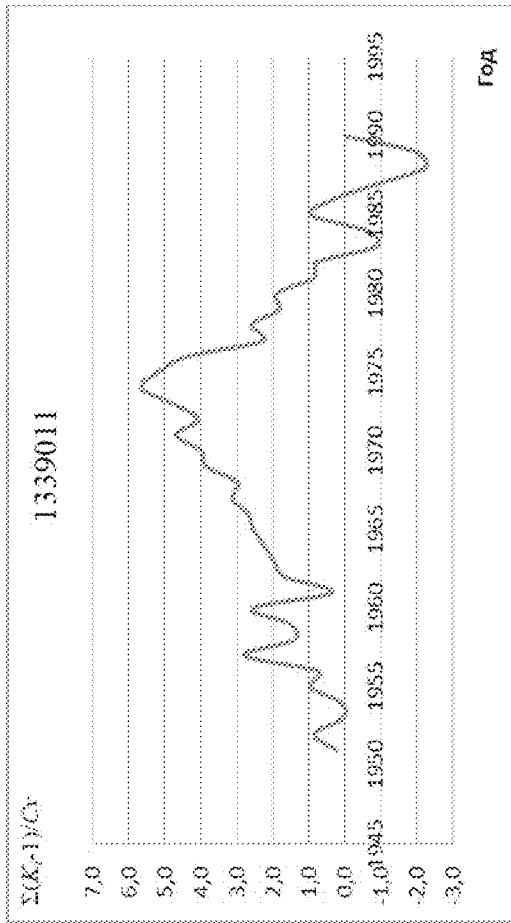
ak



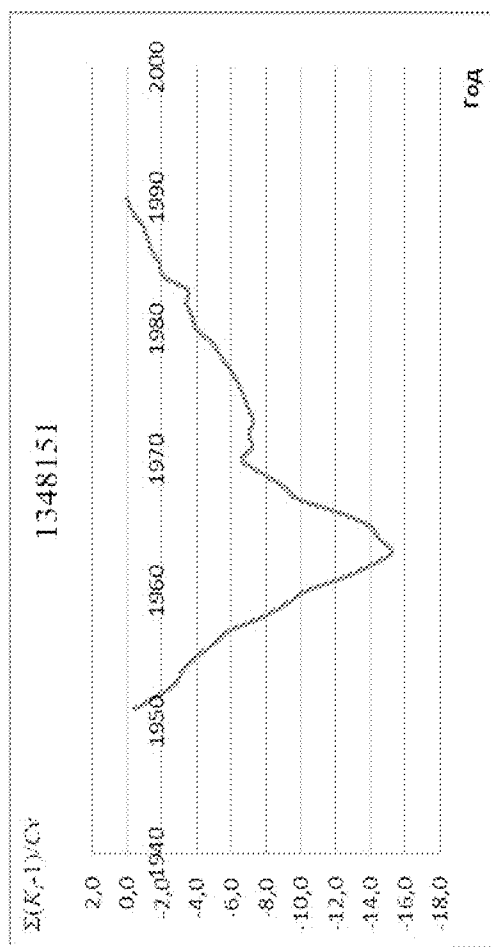
α11)



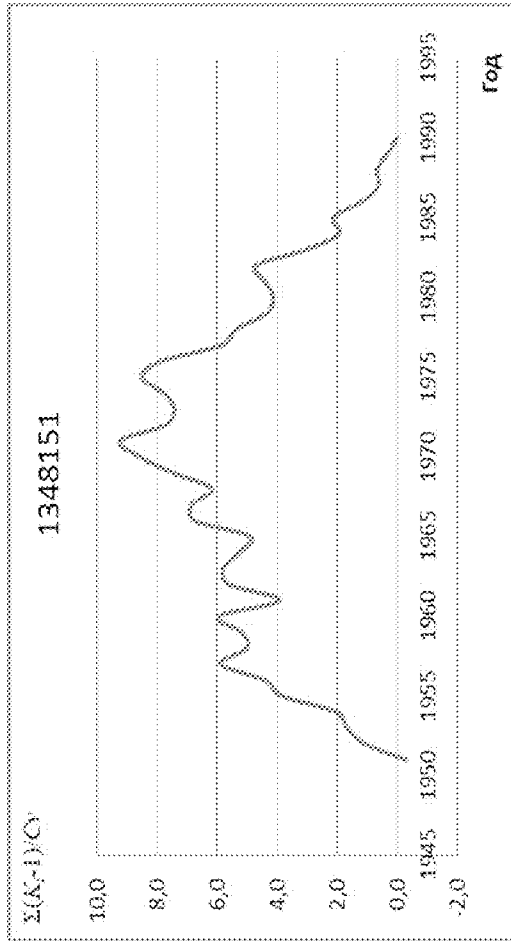
α11')



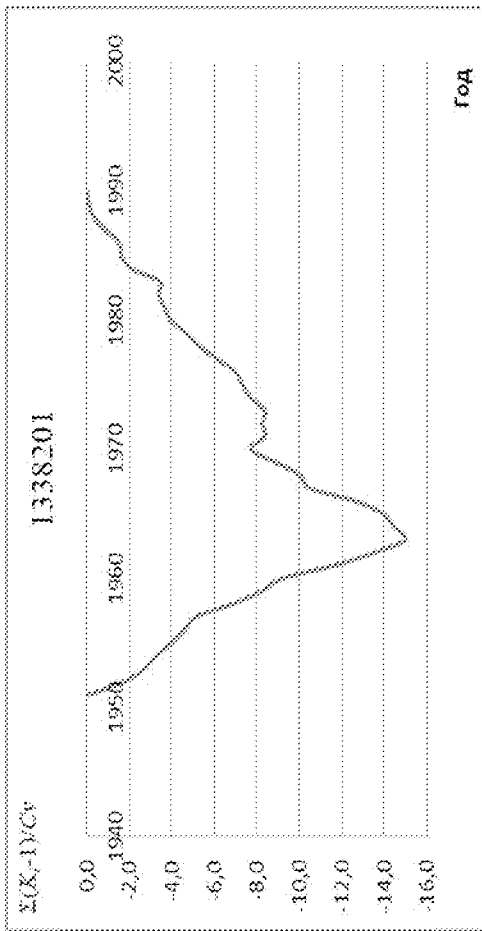
α11)



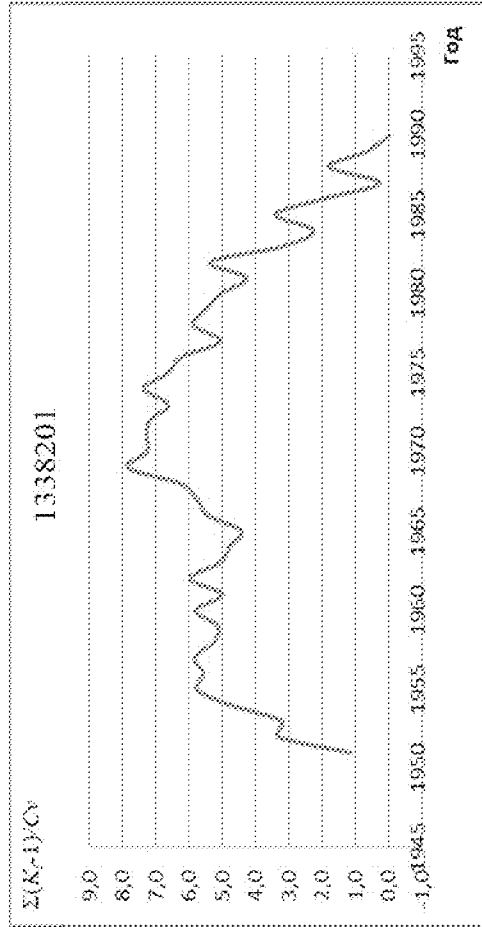
α11')



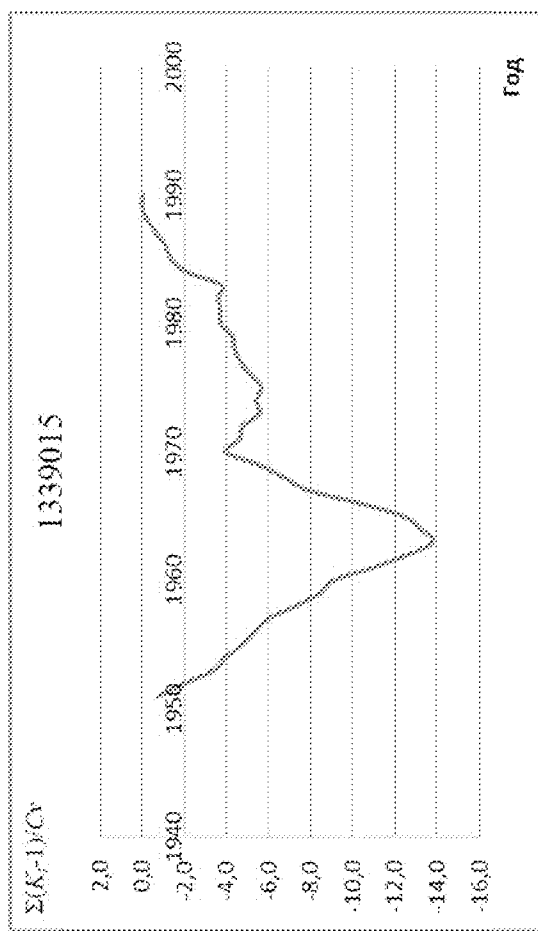
an)



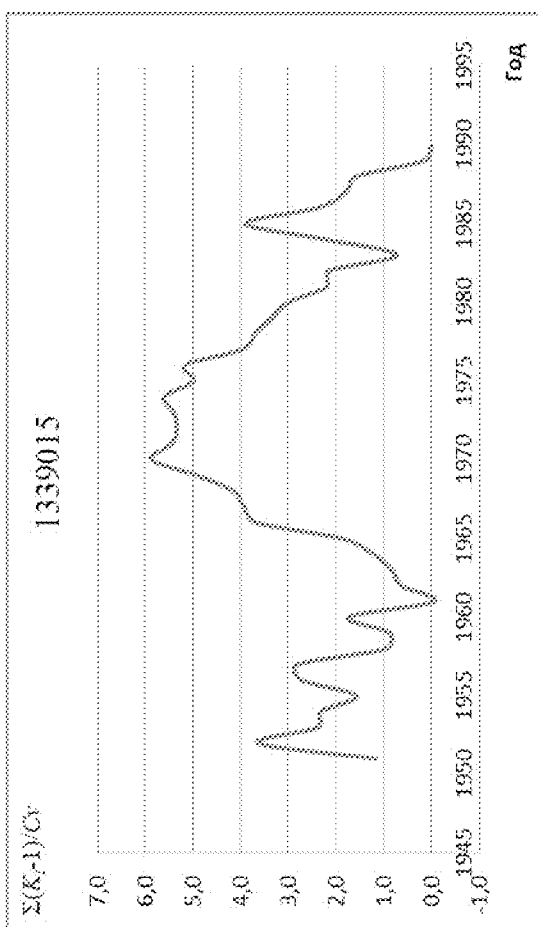
an')



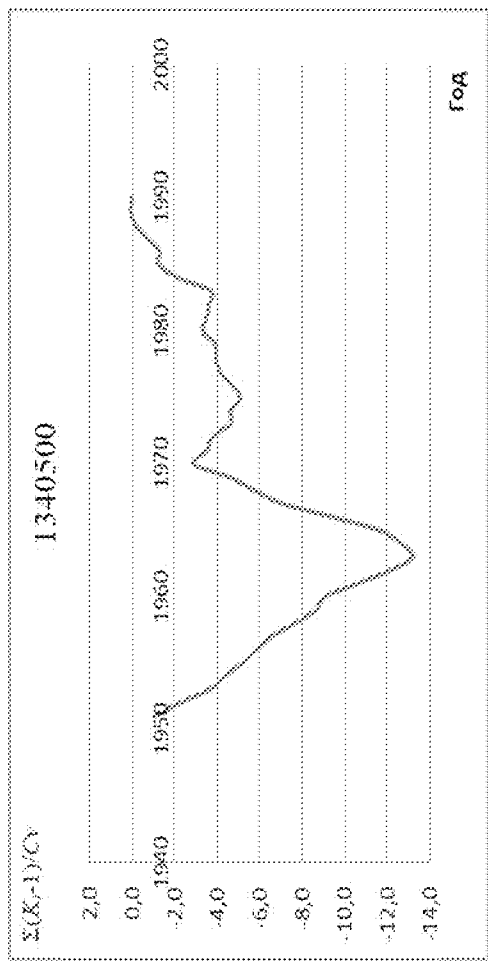
ao)



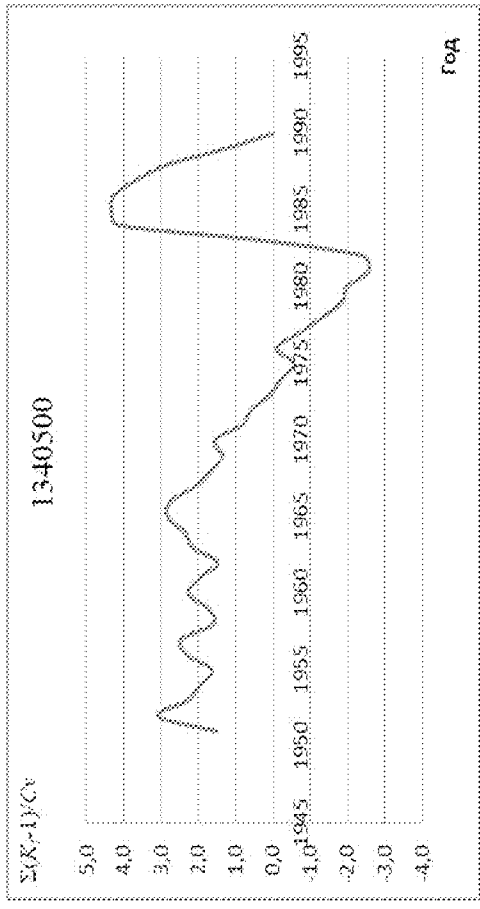
ao')



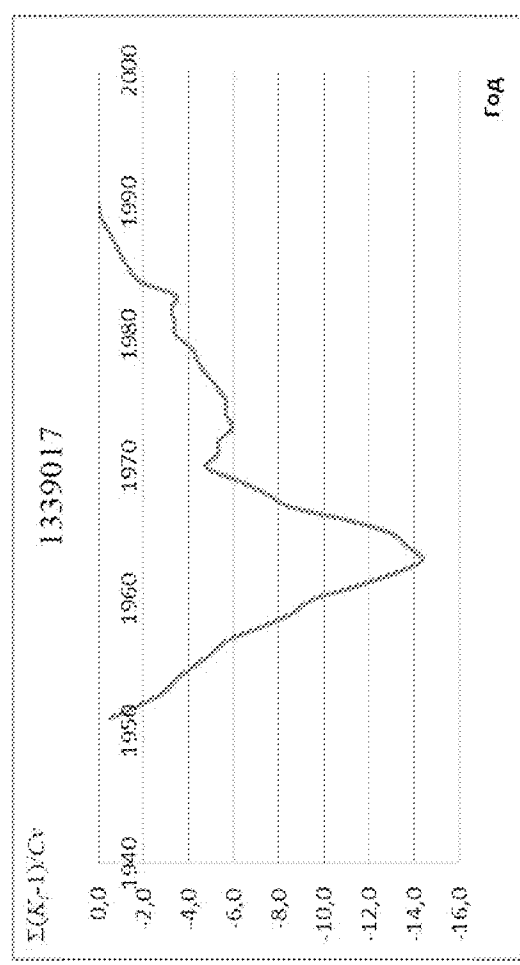
an)



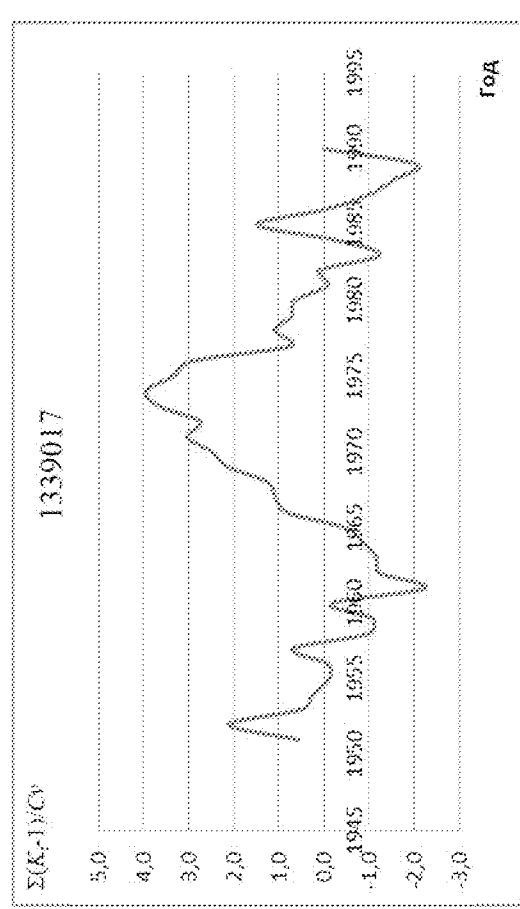
an')



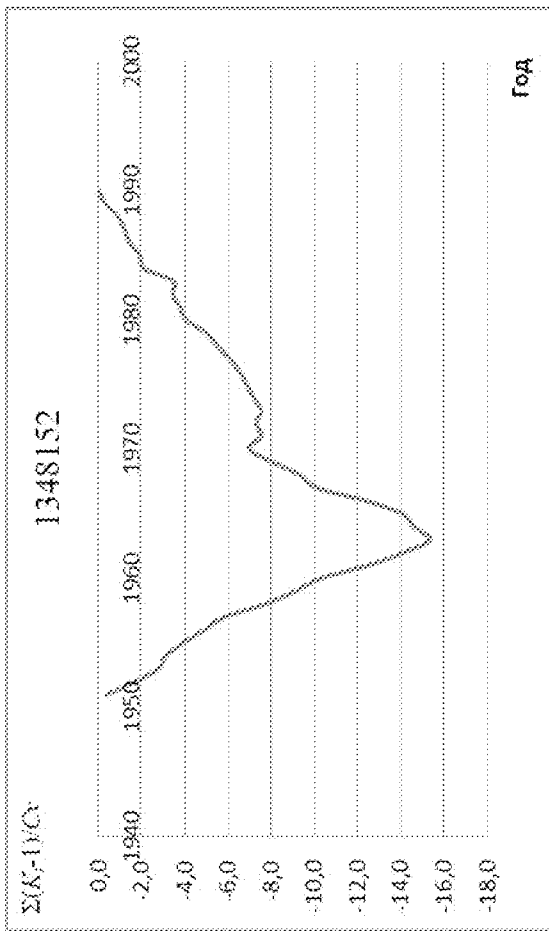
ap)



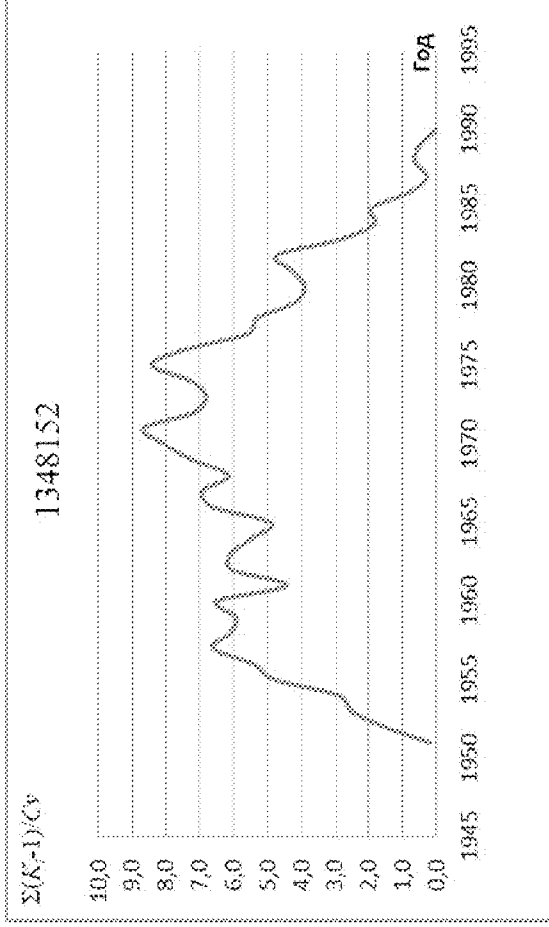
ap')



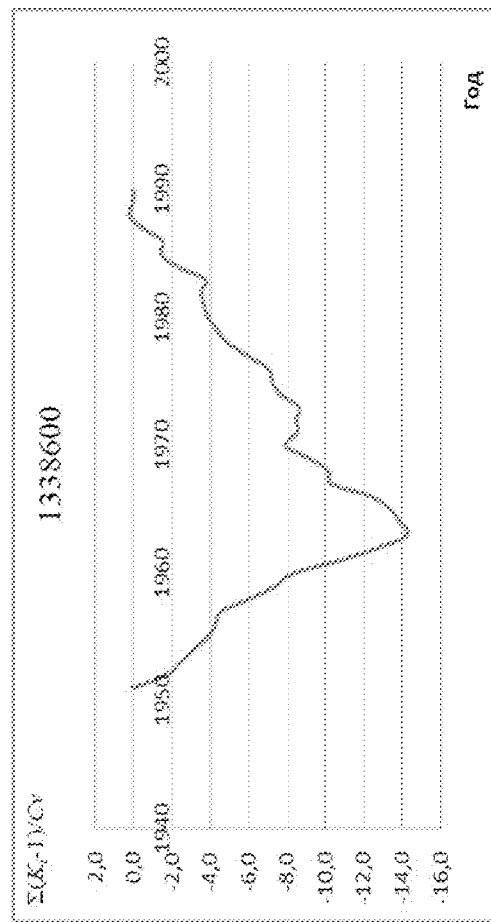
ac)



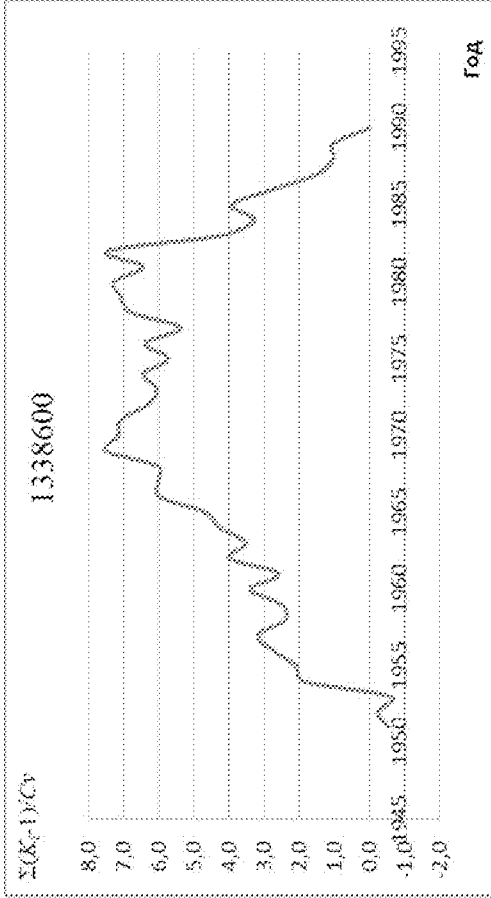
ac')



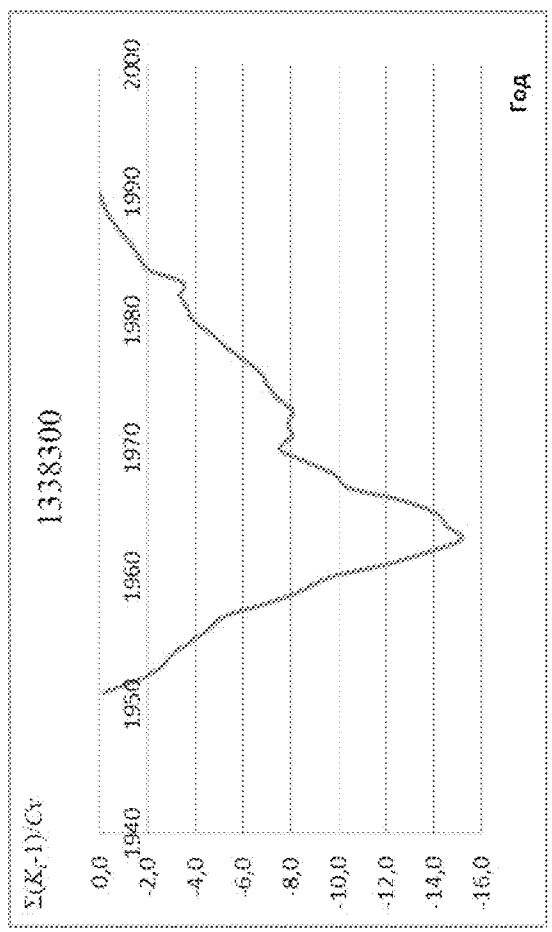
am)



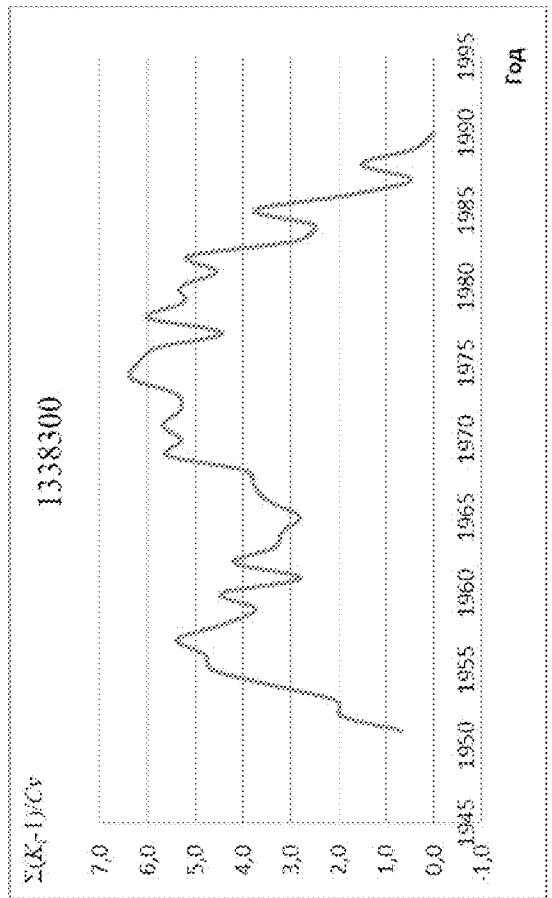
am')



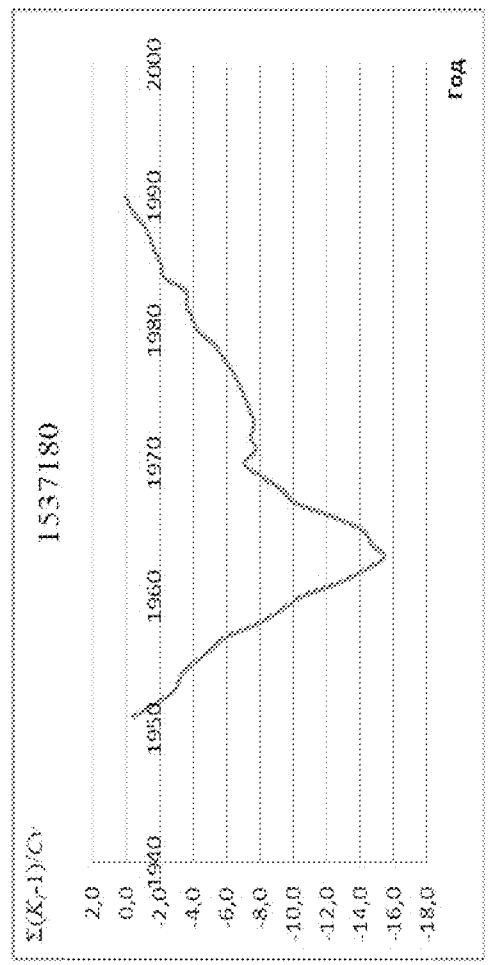
$\alpha\gamma'$



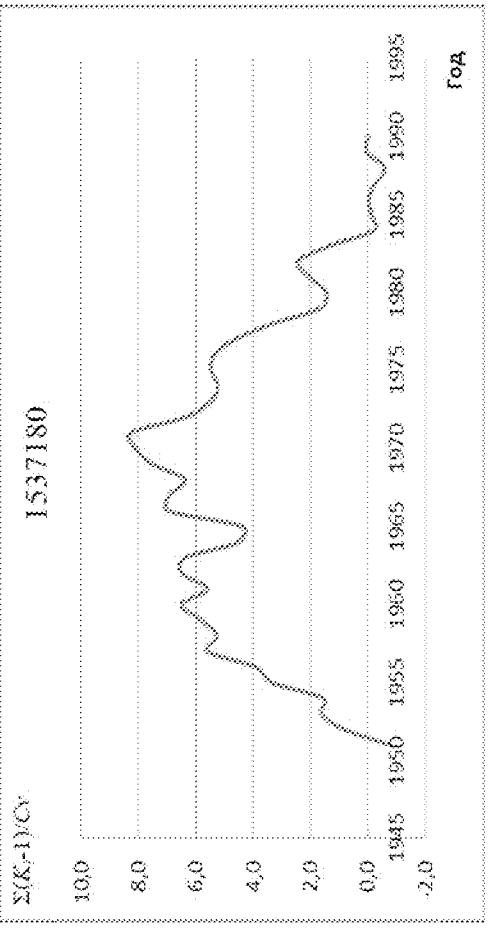
$\alpha\gamma$



$\alpha\phi'$

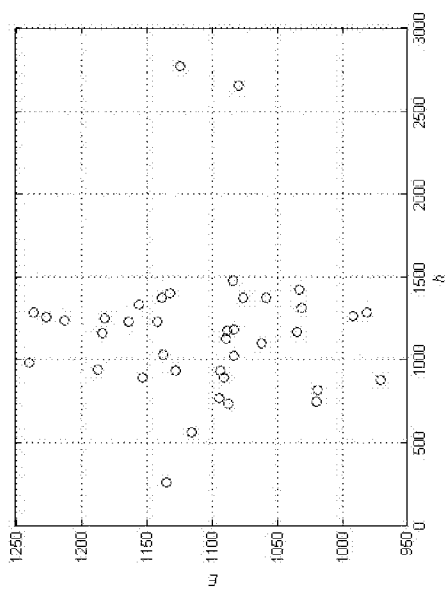


$\alpha\phi$

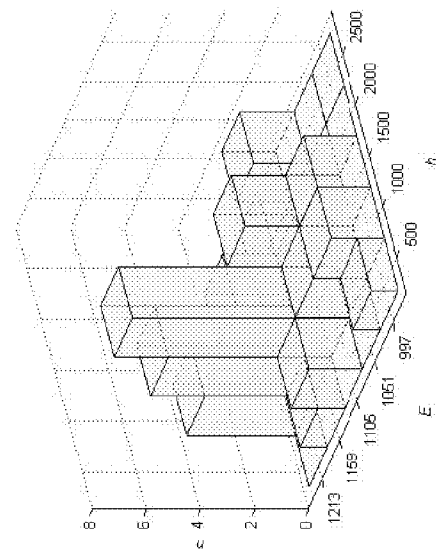


ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Эллипсы рассеивания, эмпирические гистограммы, теоретические плотности вероятности

а)



б)



в)

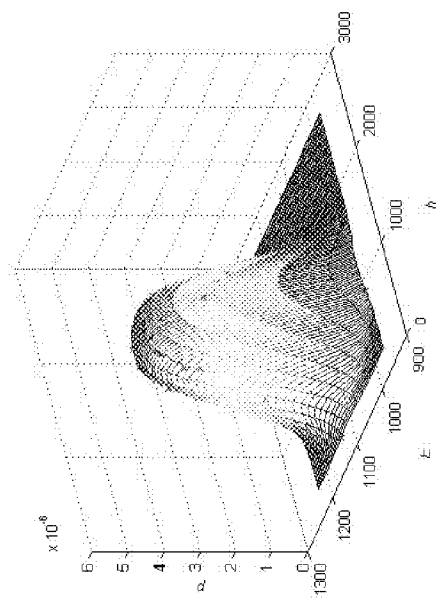
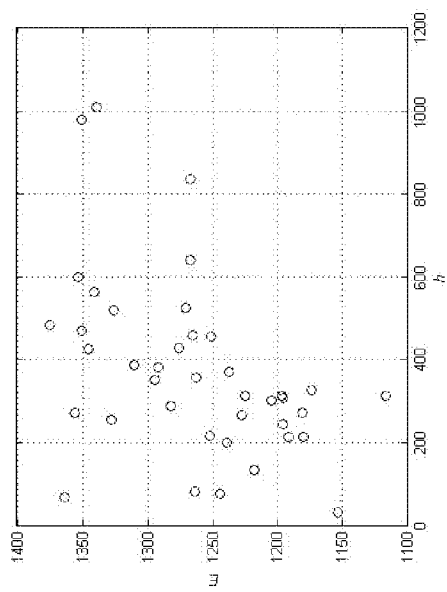
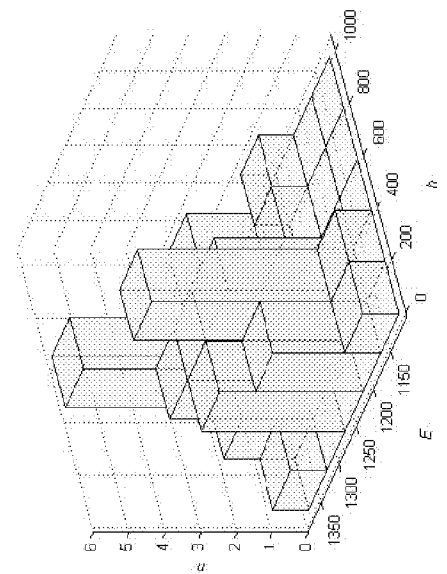


Рисунок Г.1 – 1634550

а)



б)



в)

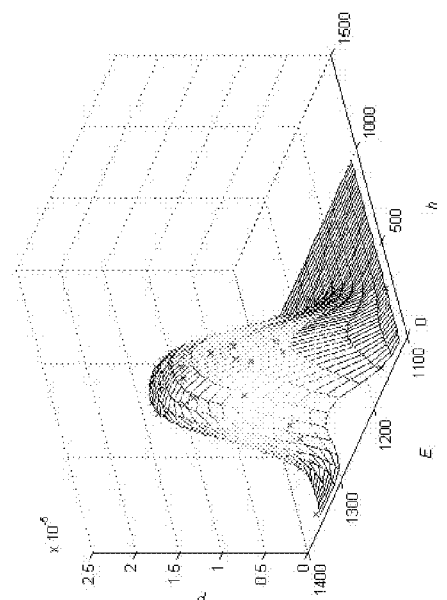
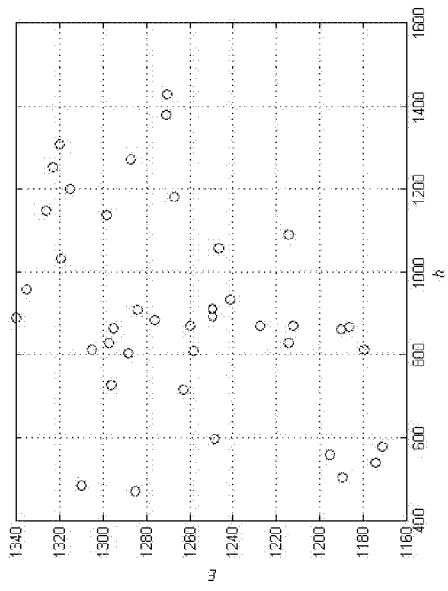
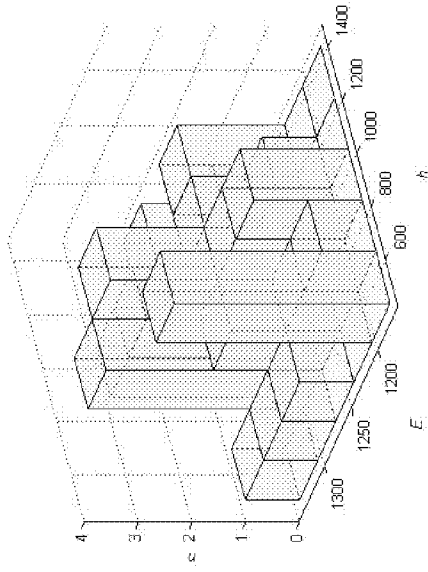


Рисунок Г.2 – 1634100

а)



б)



в)

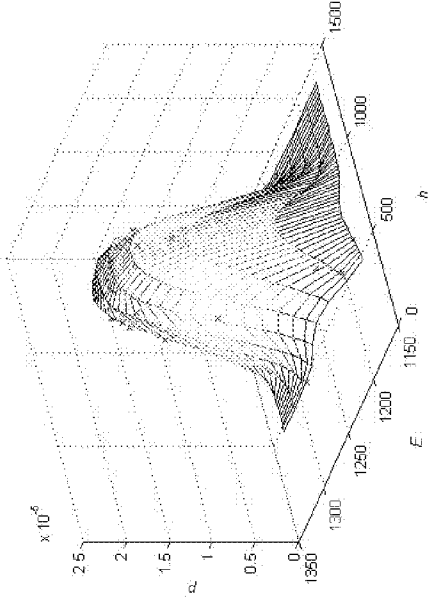
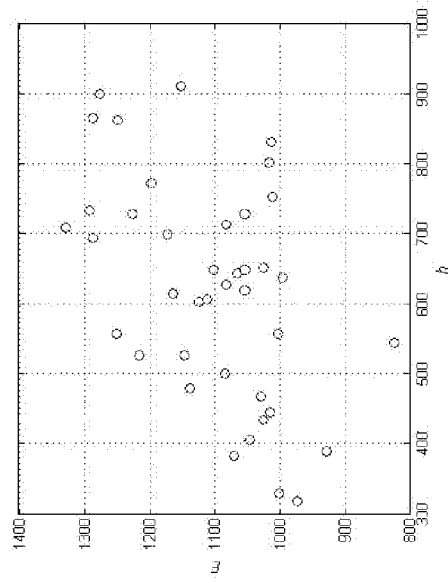
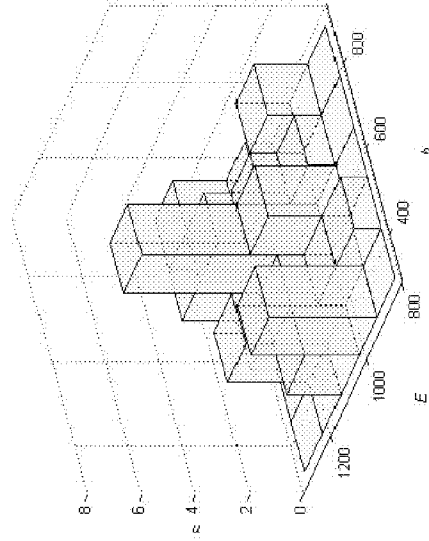


Рисунок Г.3 – 1634200

а)



б)



в)

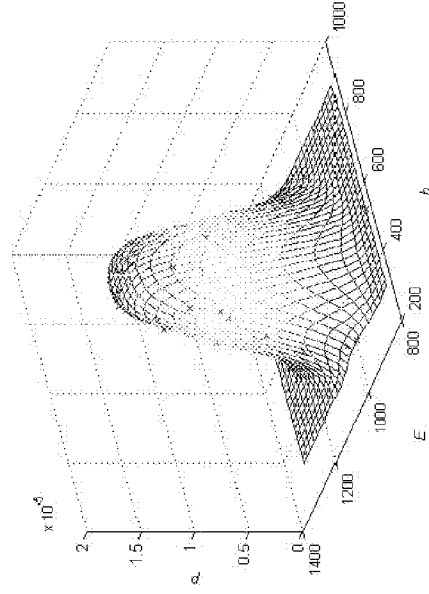
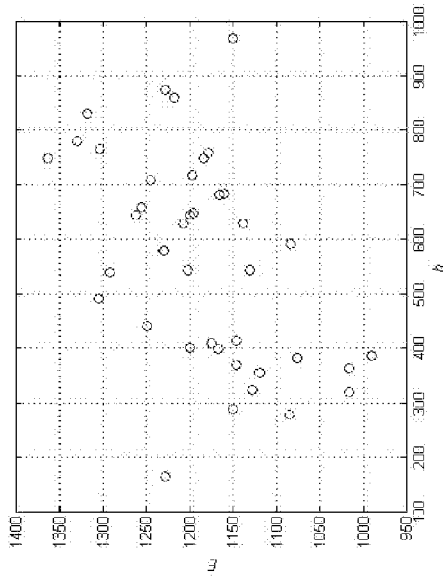
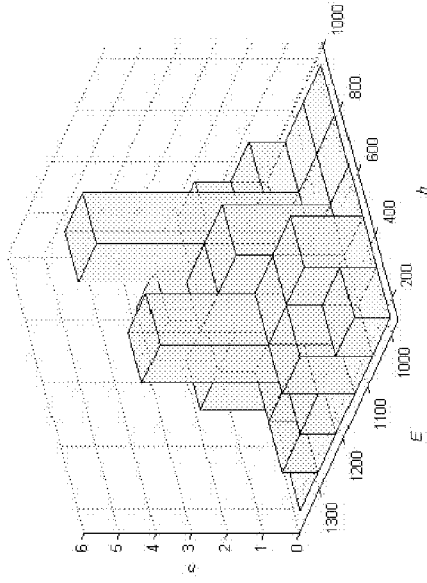


Рисунок Г.4 – 1634500

a)



б)



в)

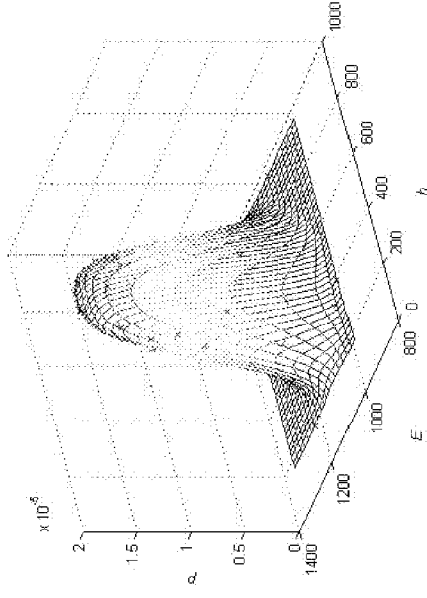
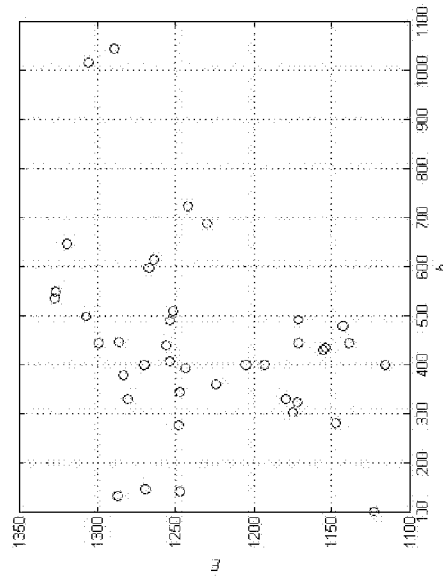
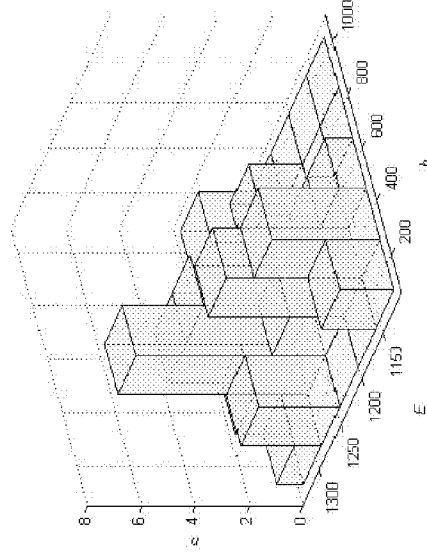


Рисунок Г.5 – 1634420

a)



б)



в)

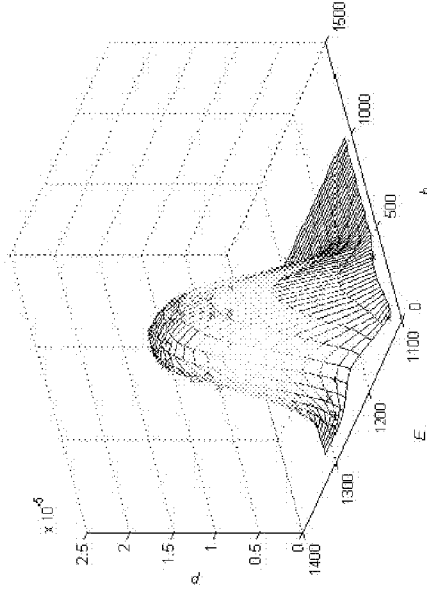
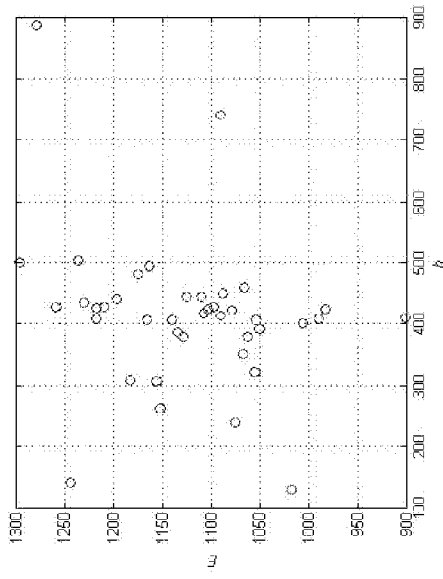
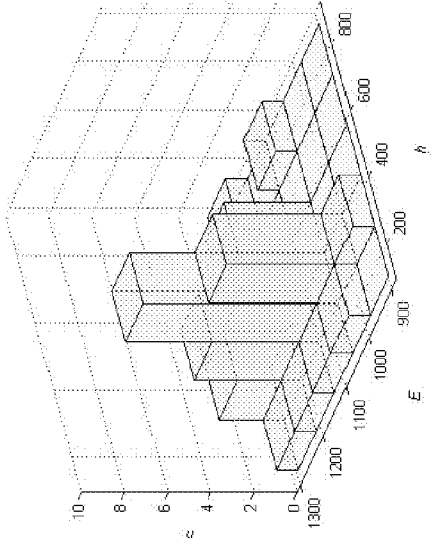


Рисунок Г.6 – 1634400

а)



б)



в)

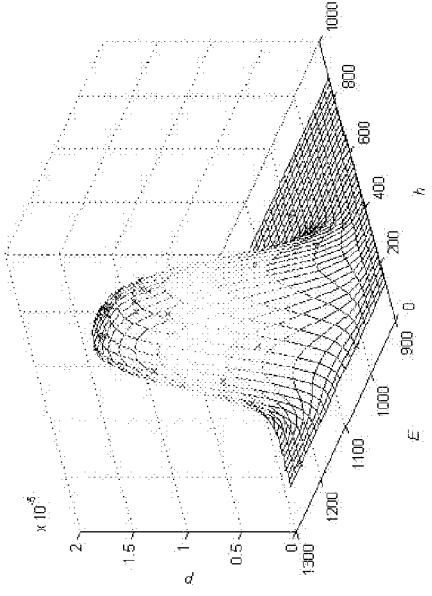
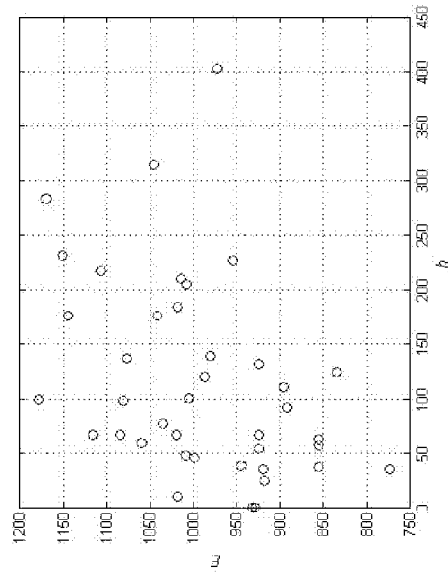
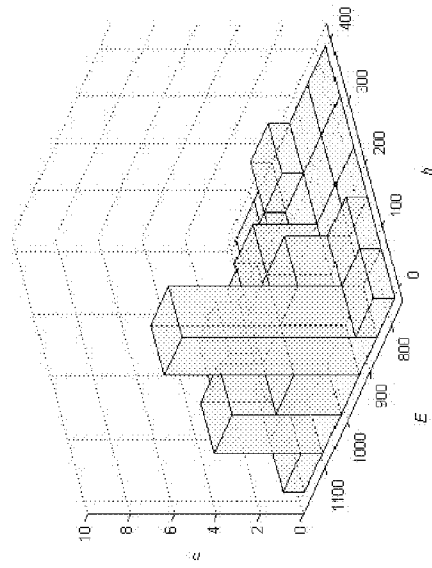


Рисунок Г.7 – 1634800

а)



б)



в)

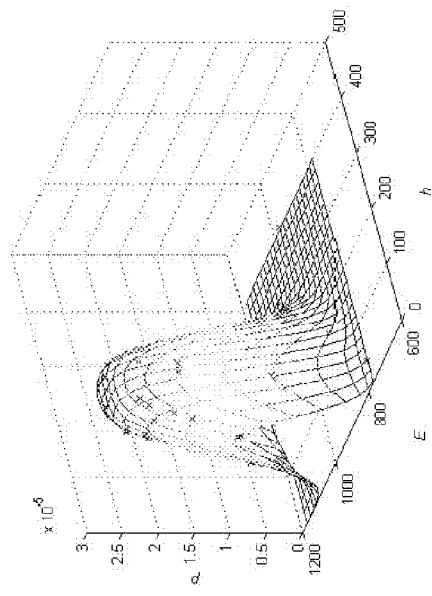
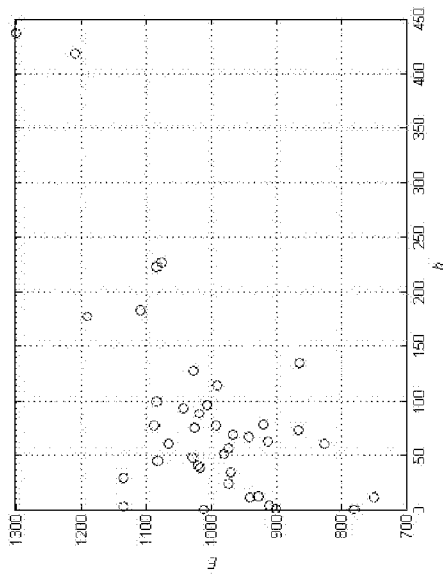
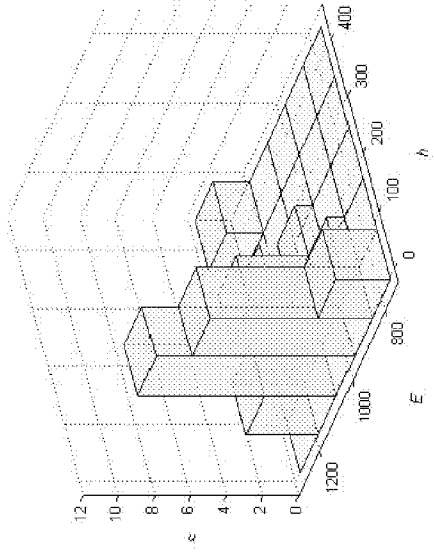


Рисунок Г.8 – 1734480

a)



б)



в)

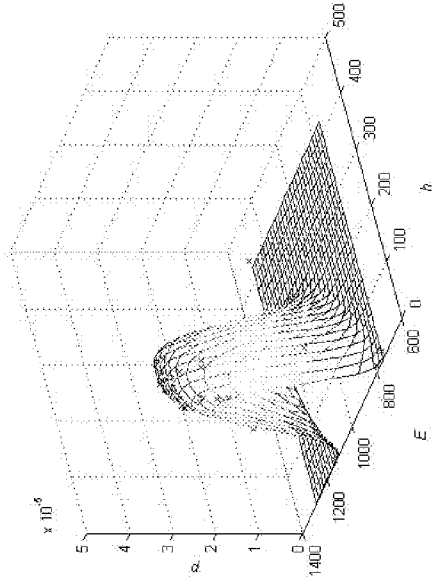
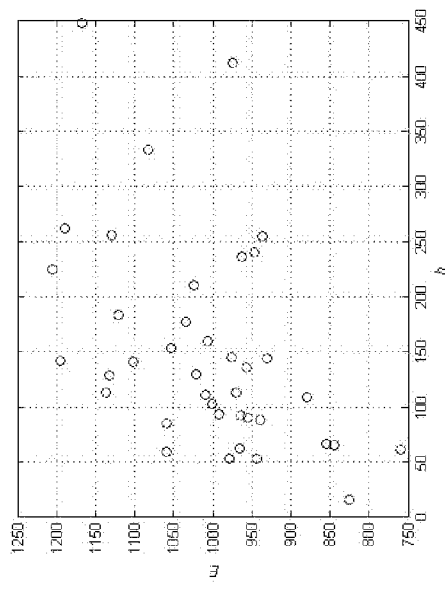
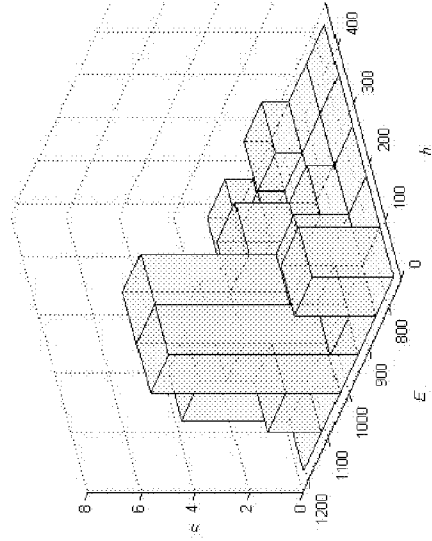


Рисунок Г.9 – 1726100

a)



б)



в)

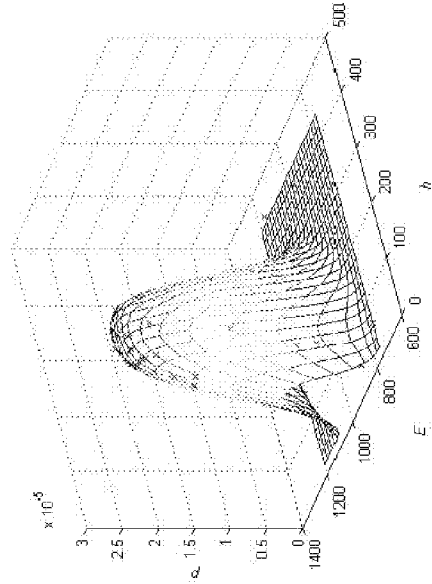
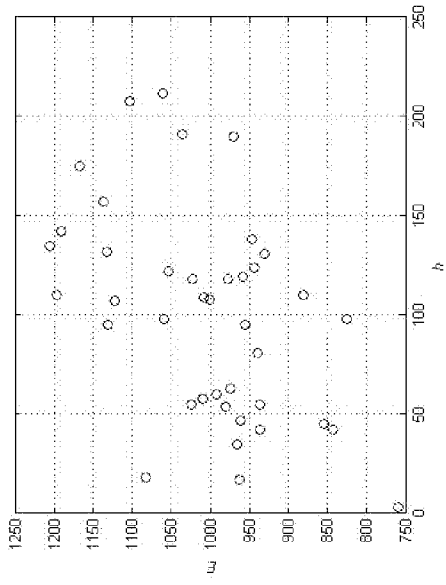
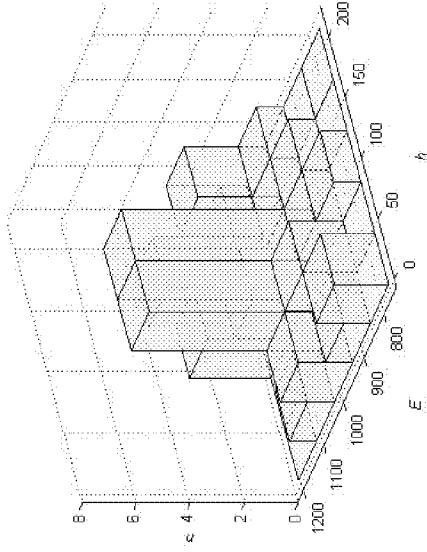


Рисунок Г.10 – 1734400

a)



б)



в)

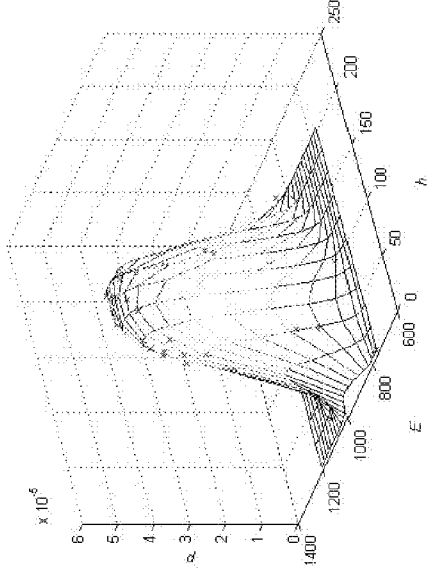
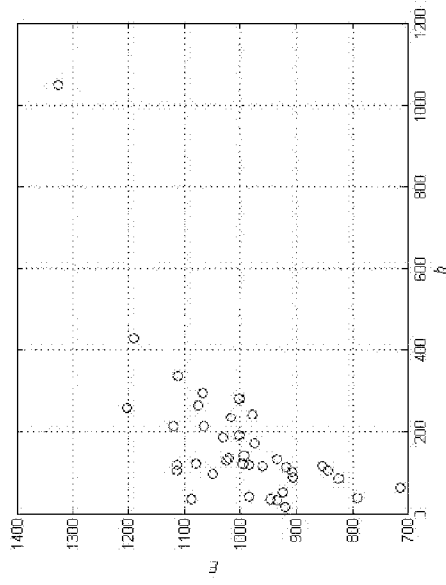
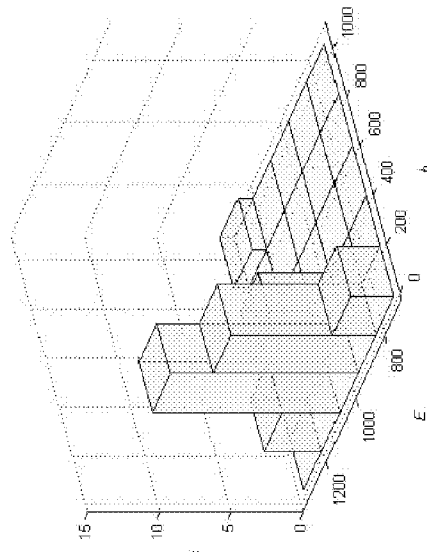


Рисунок Г.11 – 1734410

a)



б)



в)

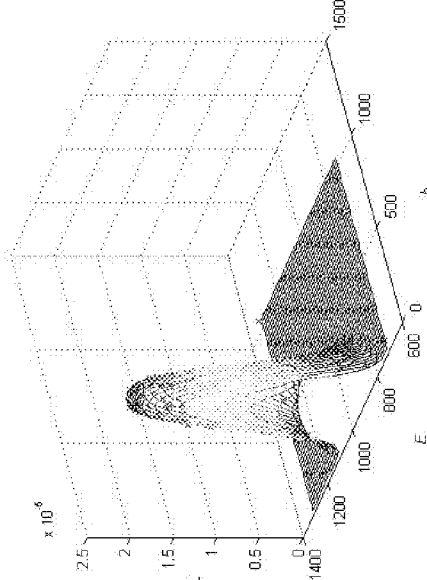
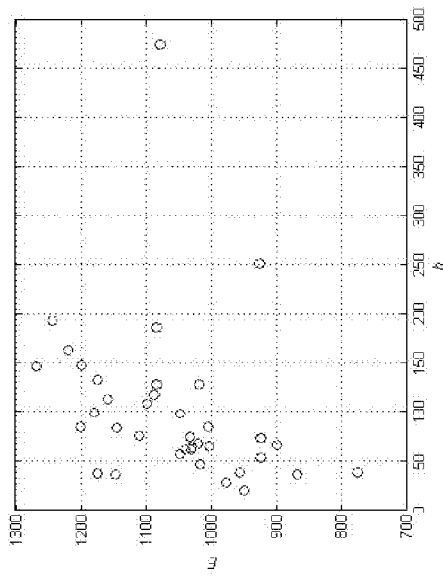
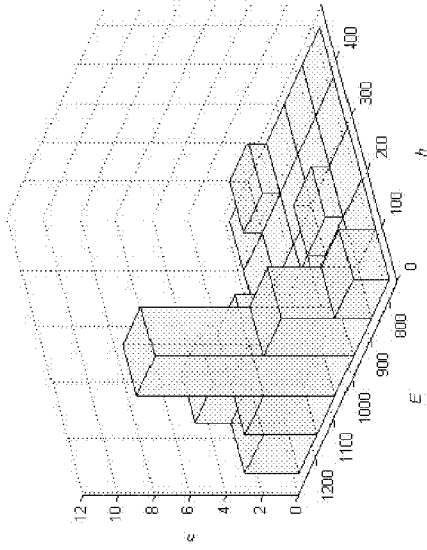


Рисунок Г.12 – 1732100

a)



б)



в)

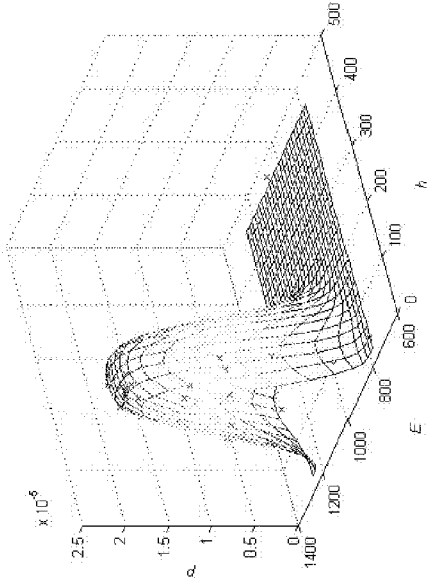
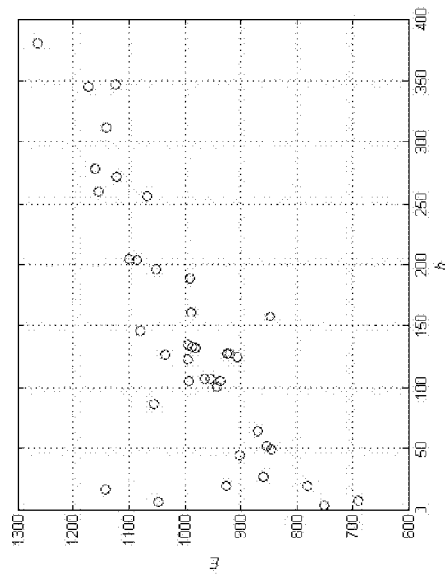
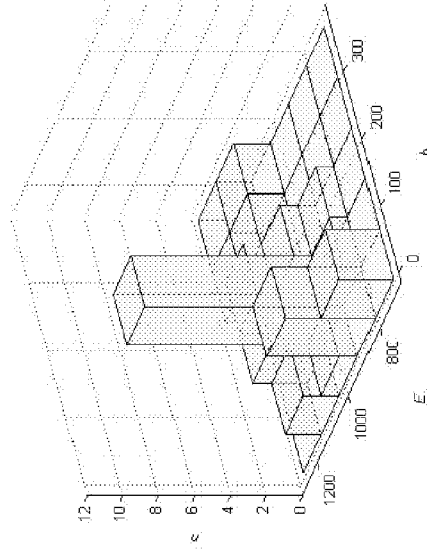


Рисунок Г.13 – 1731400

a)



б)



в)

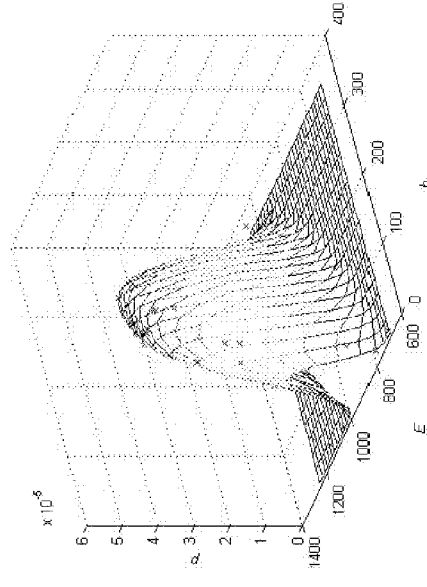
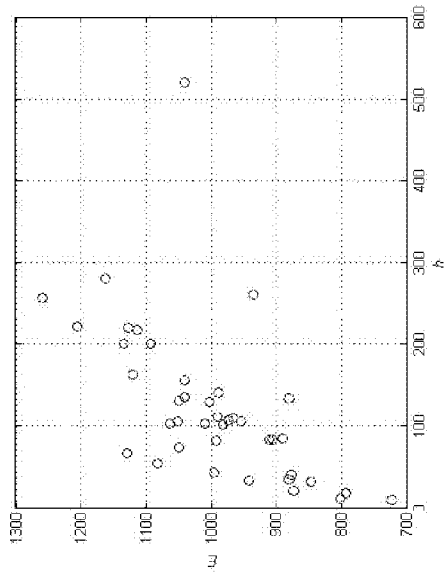
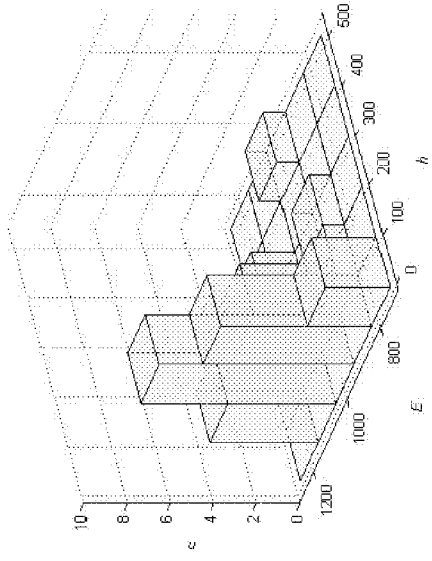


Рисунок Г.14 – 1733300

а)



б)



в)

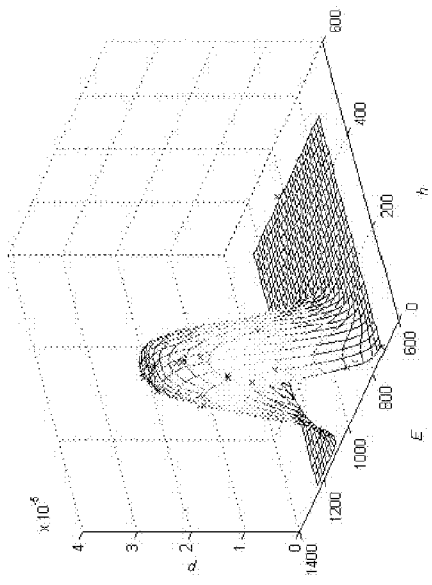
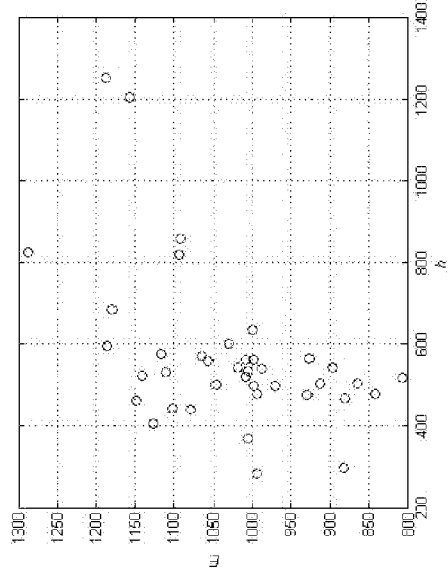
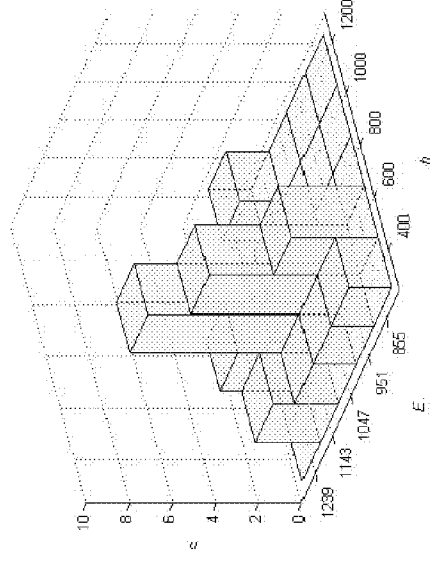


Рисунок Г.15 – 1733600

а)



б)



в)

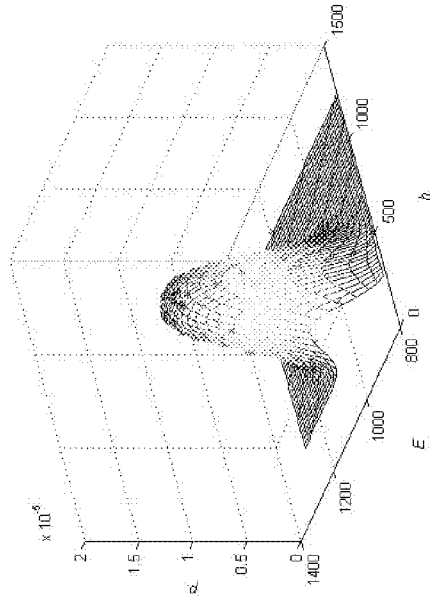
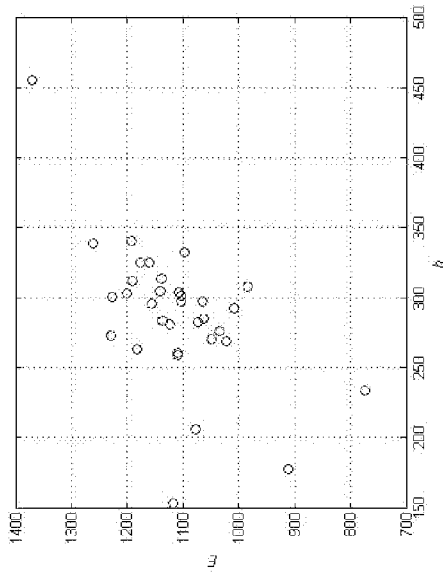
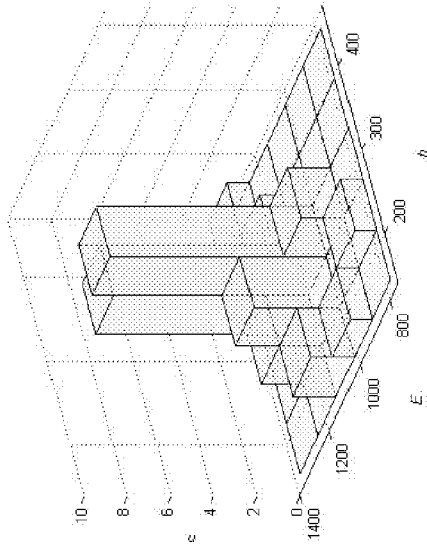


Рисунок Г.16 – 1434780

а)



б)



в)

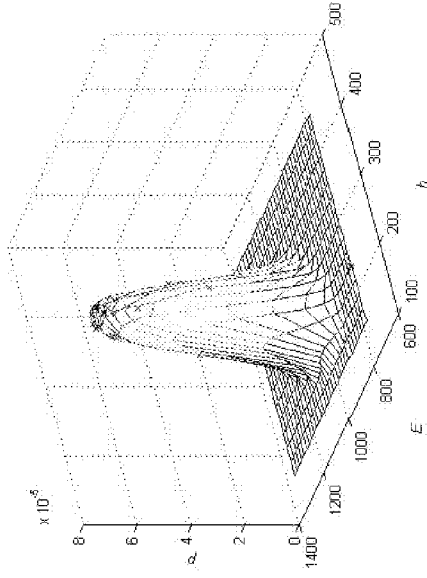
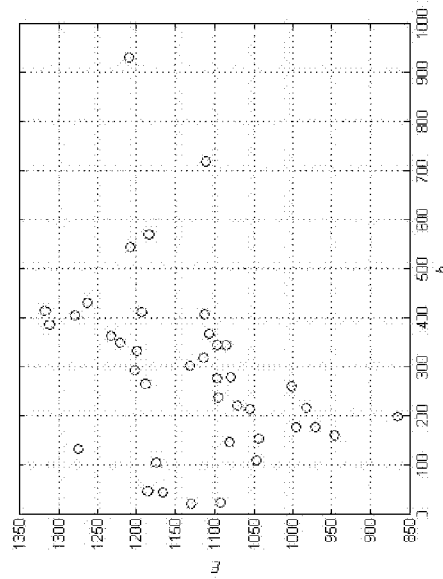
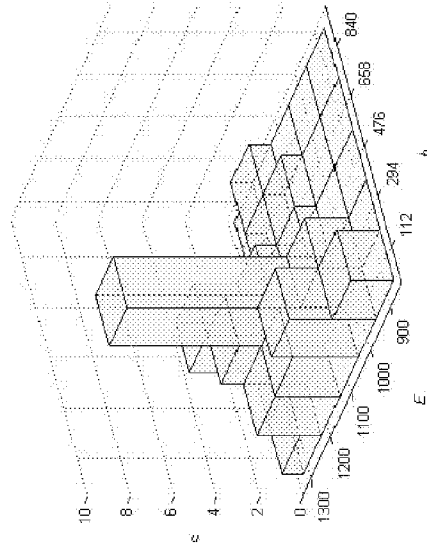


Рисунок Г.17 – 1530100

а)



б)



в)

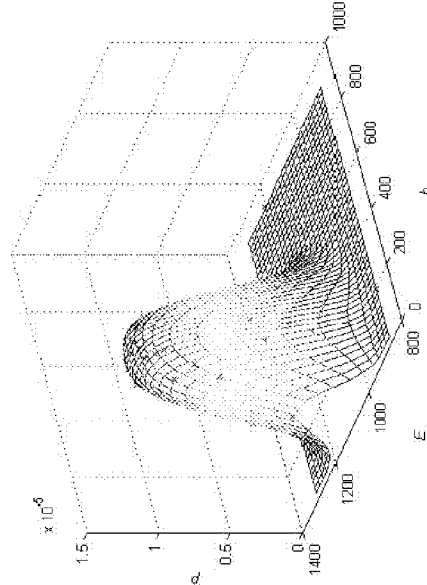
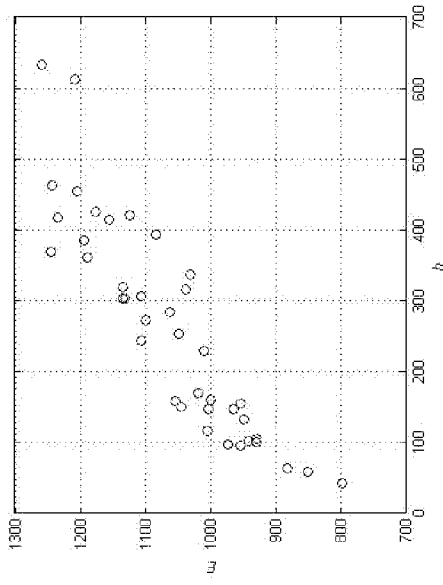
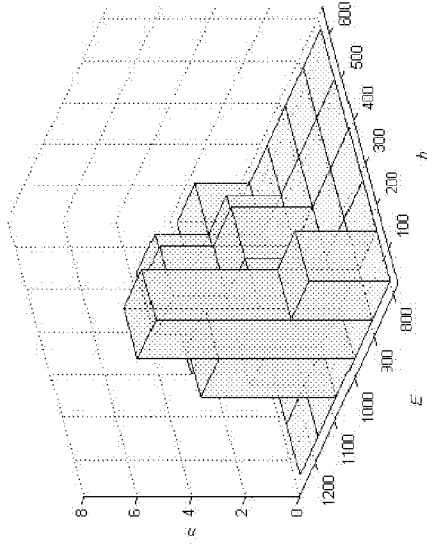


Рисунок Г.18 – 1134040

a)



б)



в)

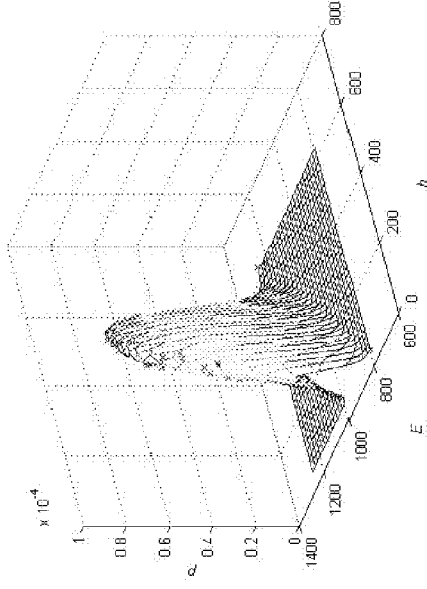
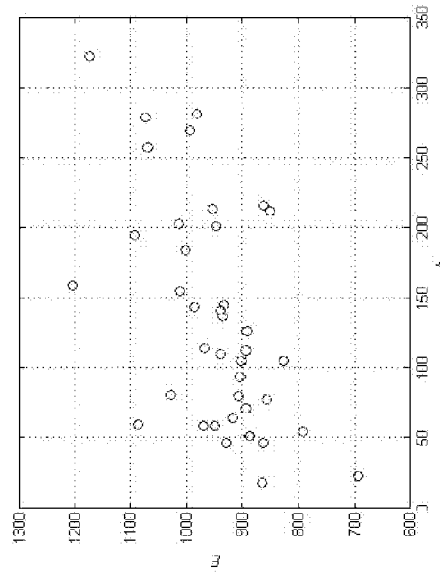
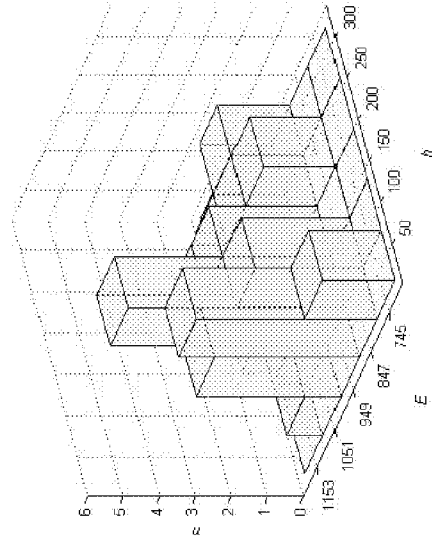


Рисунок Г.19 – 1112200

a)



б)



в)

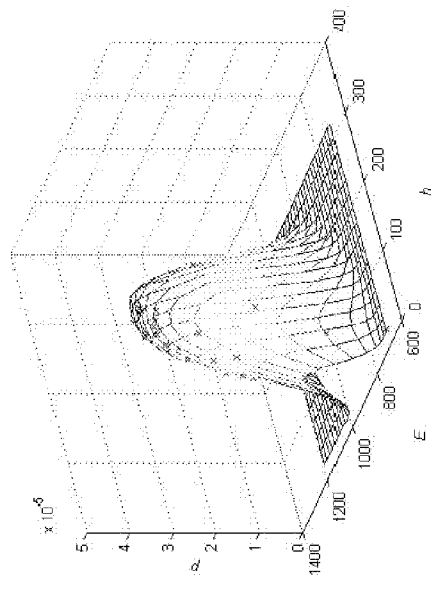
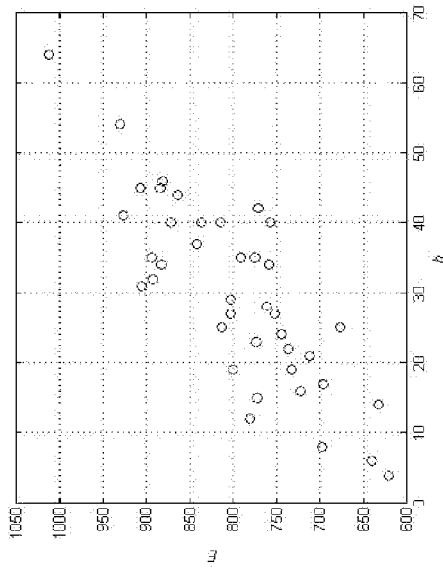
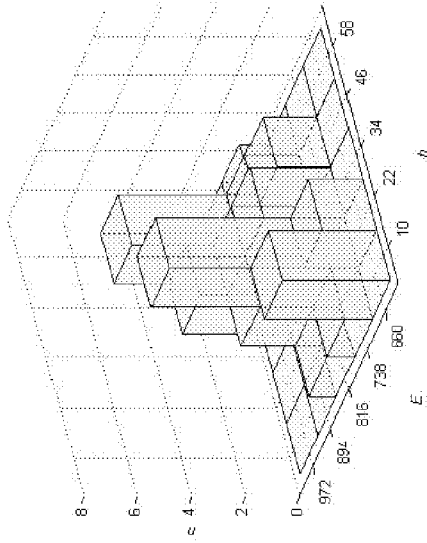


Рисунок Г.20 – 1928745

а)



б)



в)

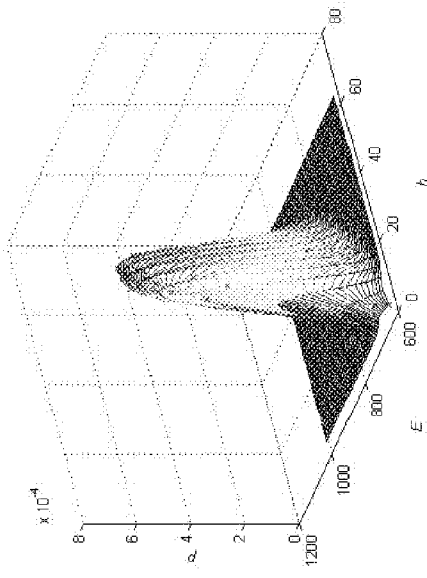
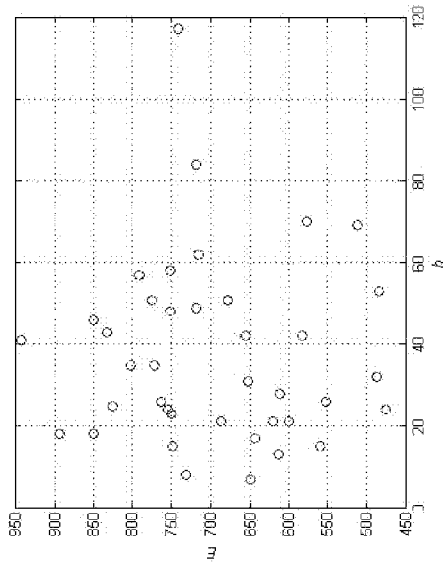
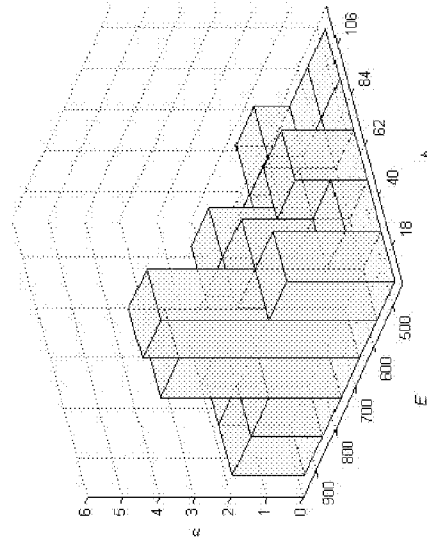


Рисунок Г.21 – 1931370

а)



б)



в)

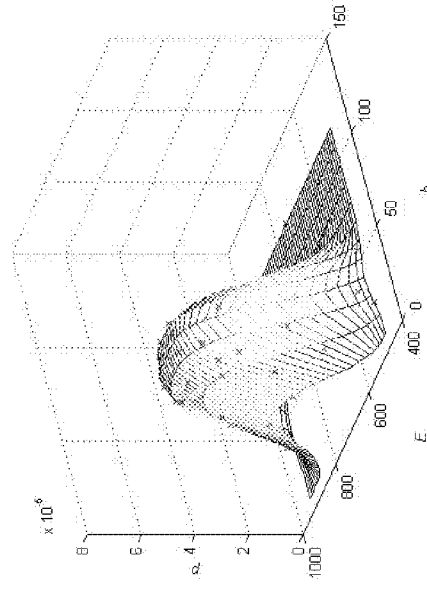
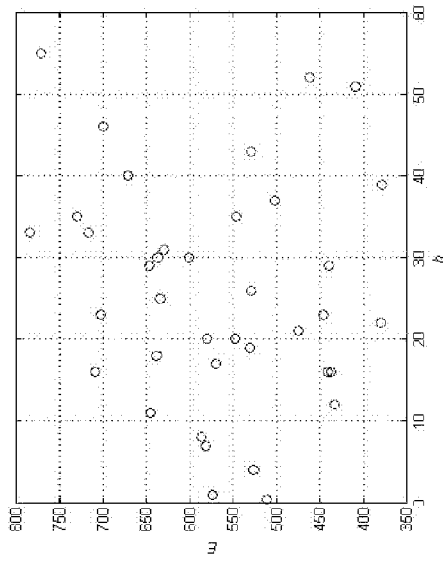
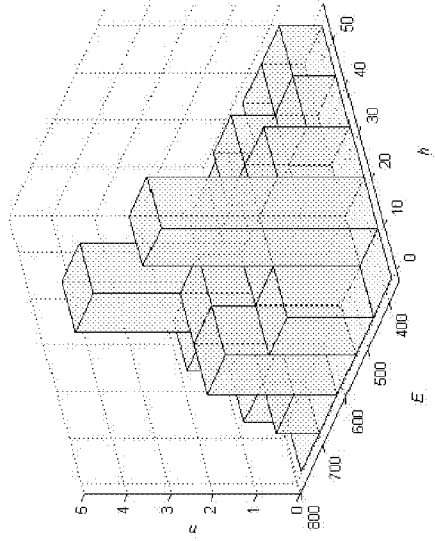


Рисунок Г.22 – 1234680

a)



б)



в)

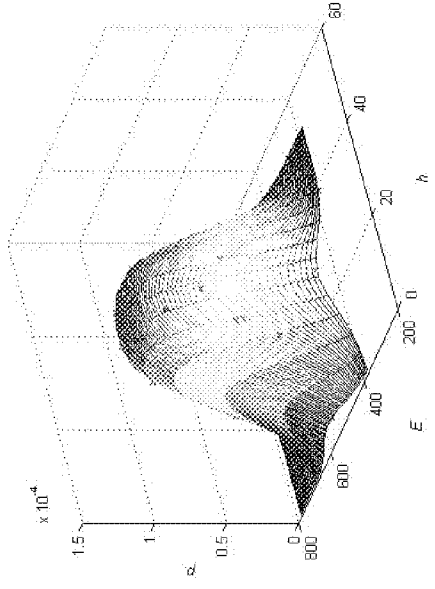
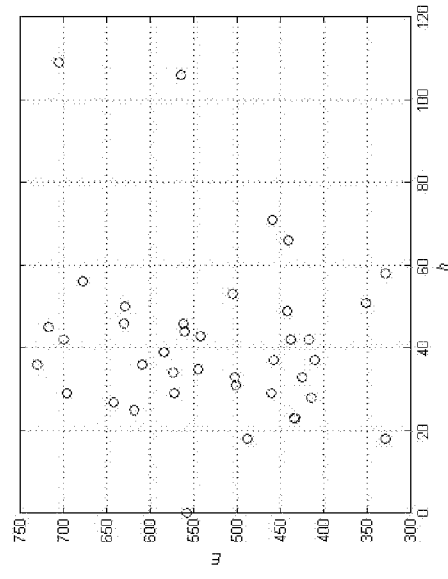
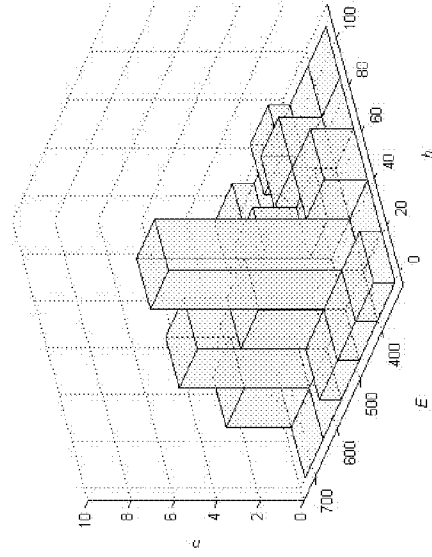


Рисунок Г.23 – 1234120

a)



б)



в)

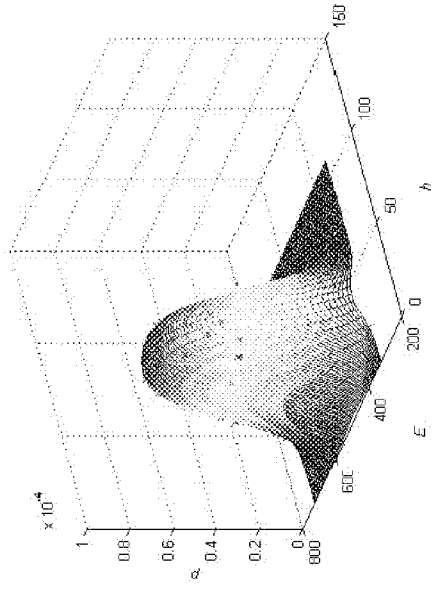
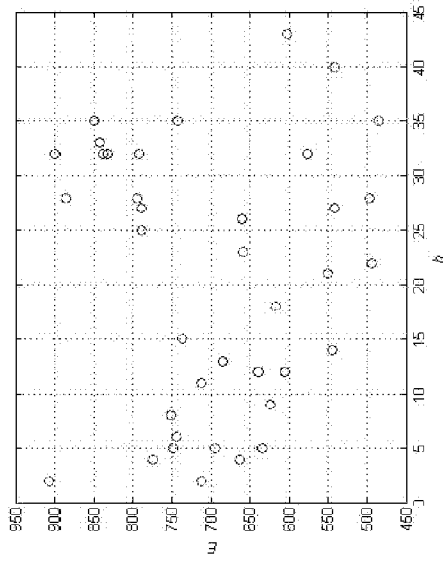
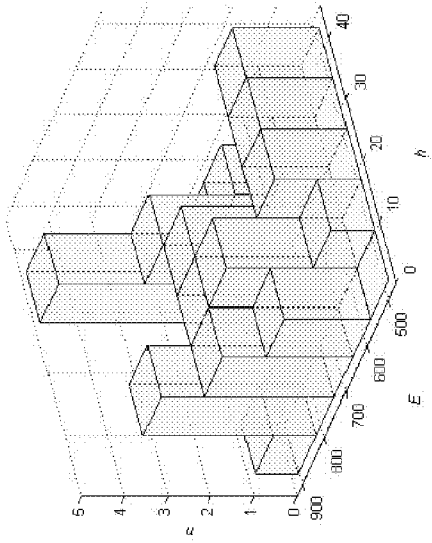


Рисунок Г.24 – 1234050

а)



б)



в)

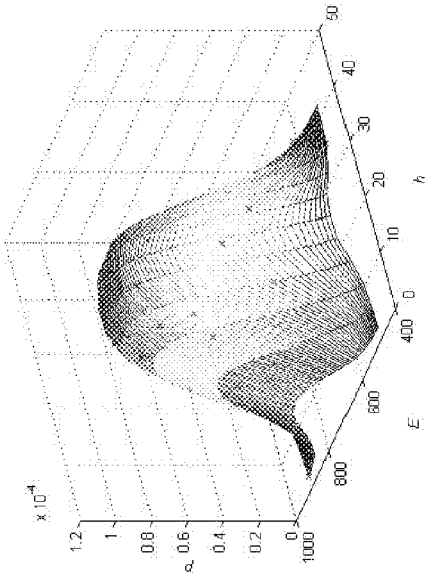
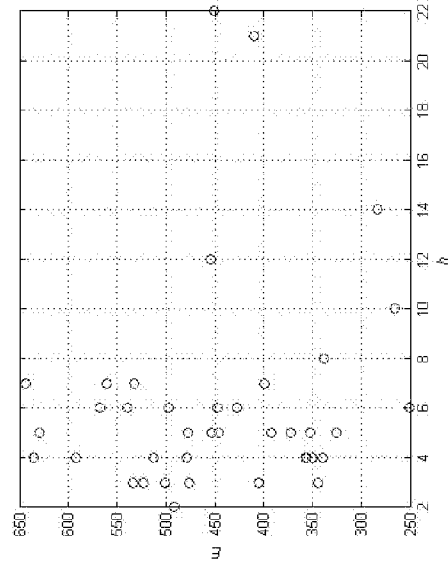
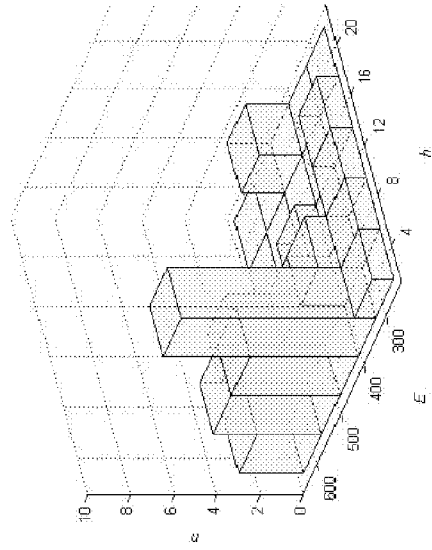


Рисунок Г.25 — 1234130

а)



б)



в)

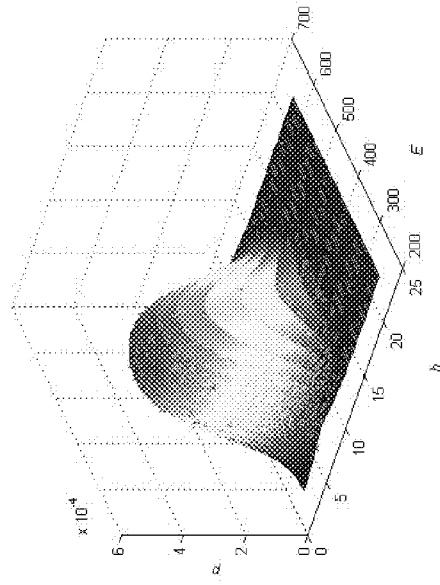
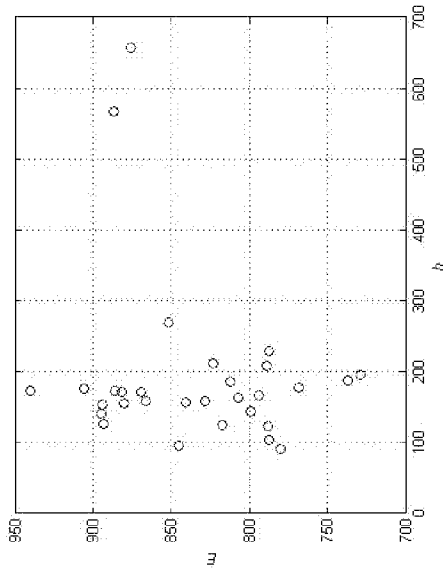
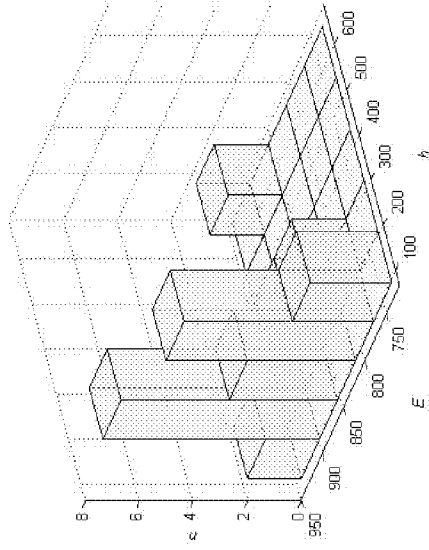


Рисунок Г.26 — 1234080

a)



б)



в)

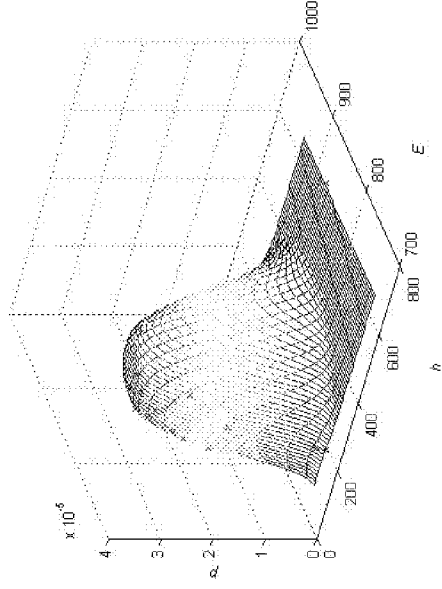
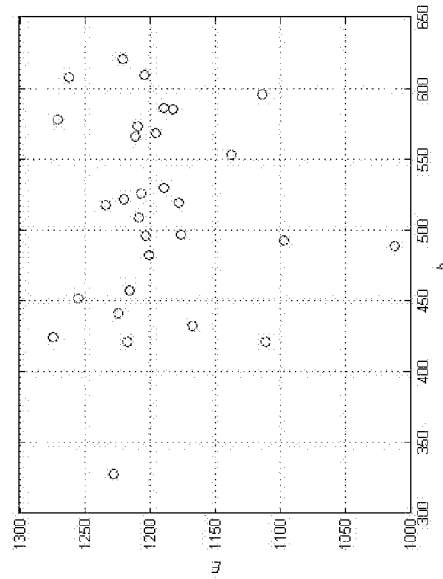
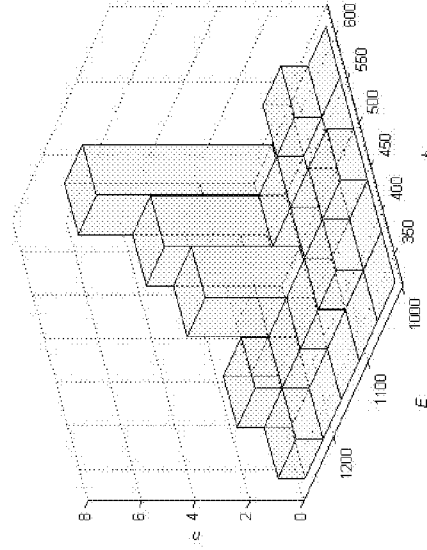


Рисунок Г.27 — 1337251

a)



б)



в)

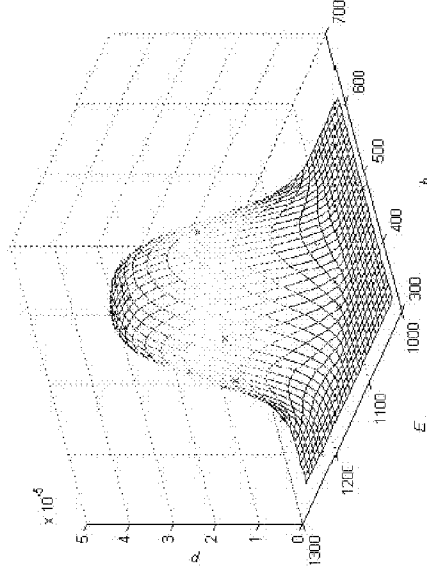
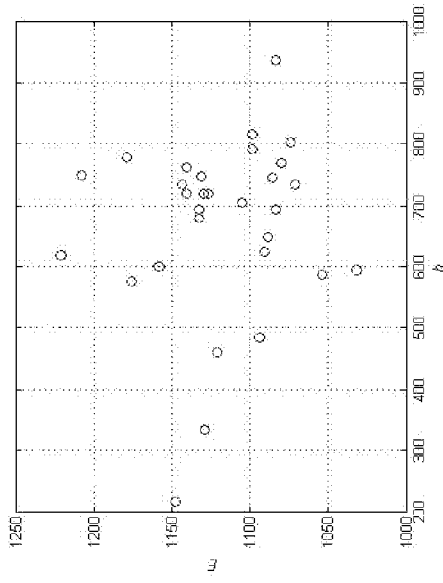
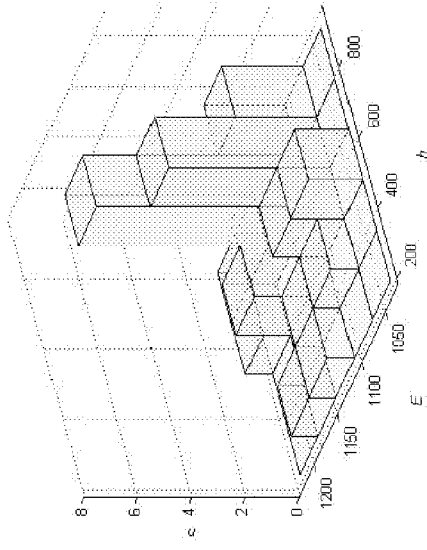


Рисунок Г.28 — 1337151

a)



б)



в)

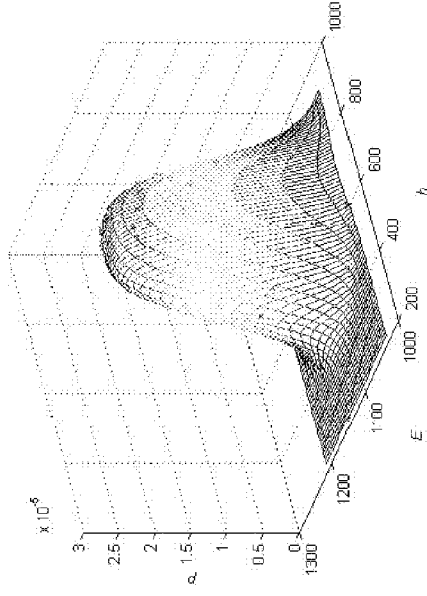
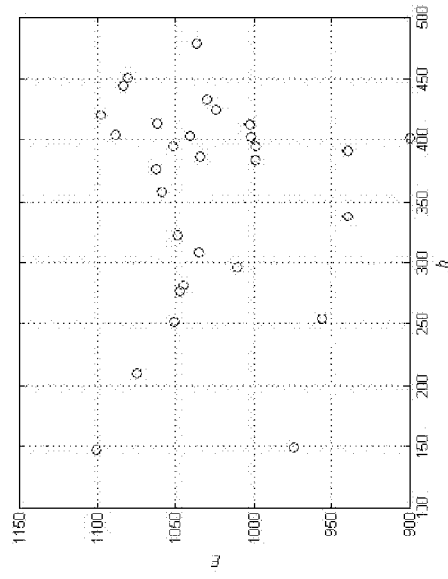
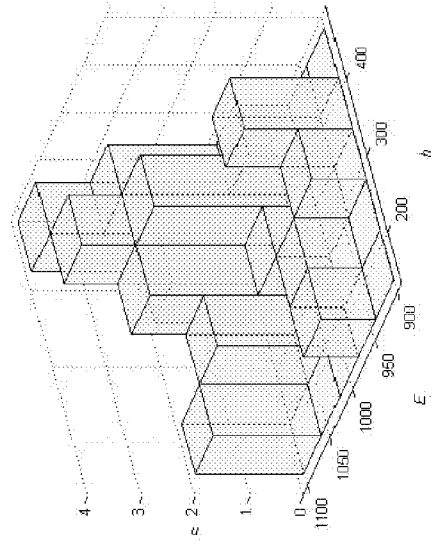


Рисунок Г.29 — 1337100

a)



б)



в)

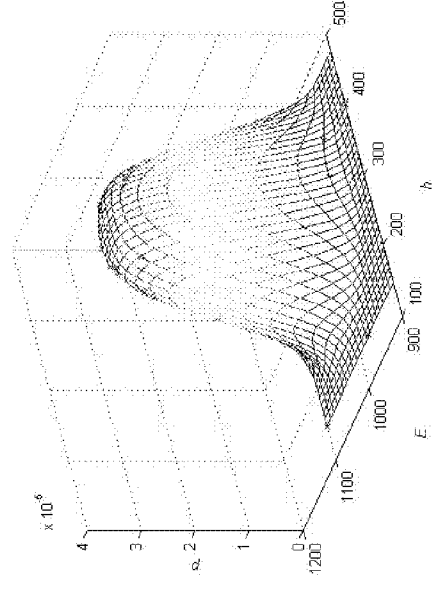
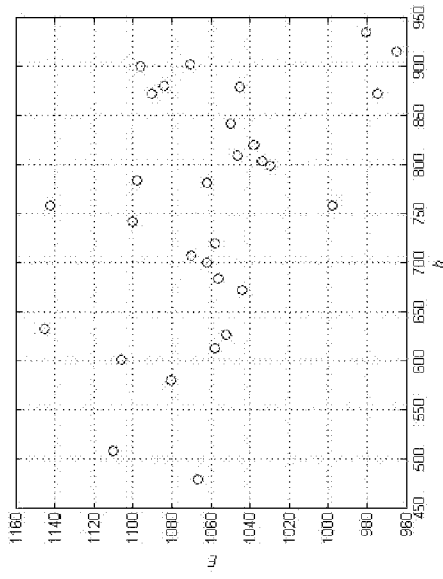
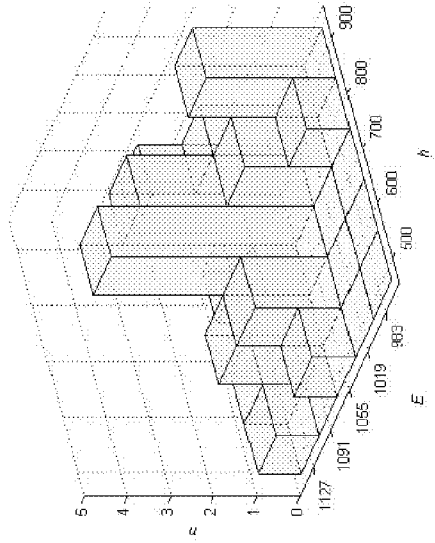


Рисунок Г.30 — 1338271

a)



б)



в)

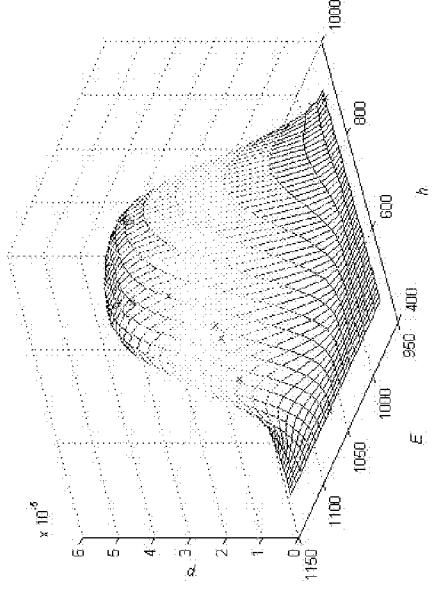
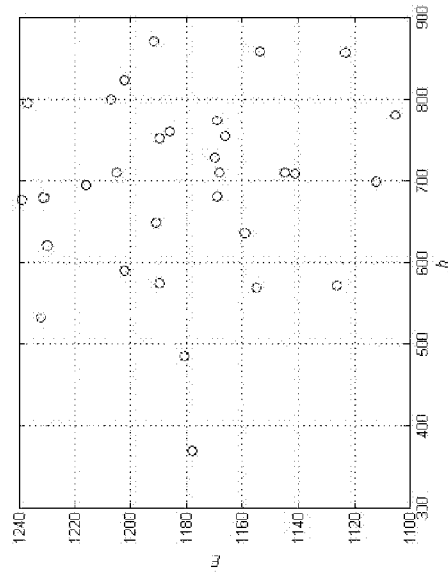
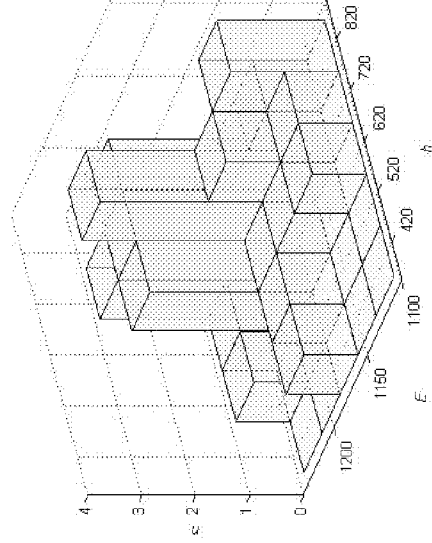


Рисунок Г.31 – 1338401

a)



б)



в)

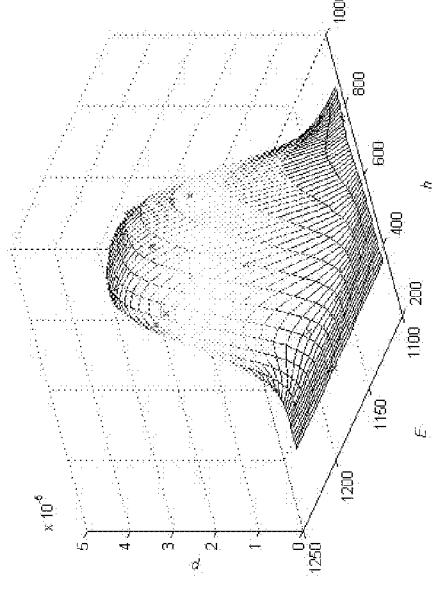
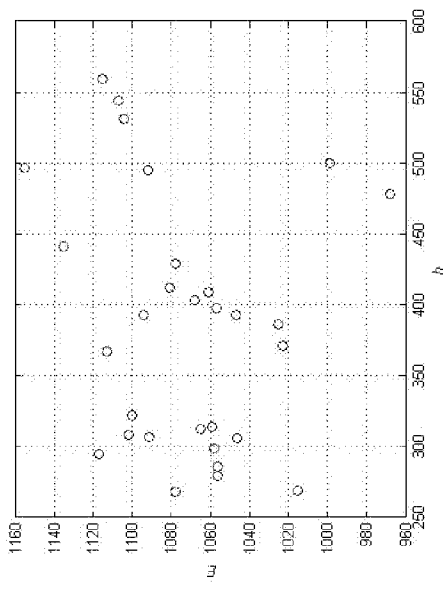
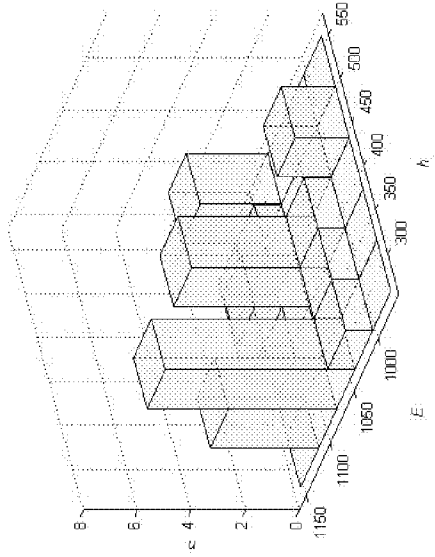


Рисунок Г.32 – 1338200

a)



б)



в)

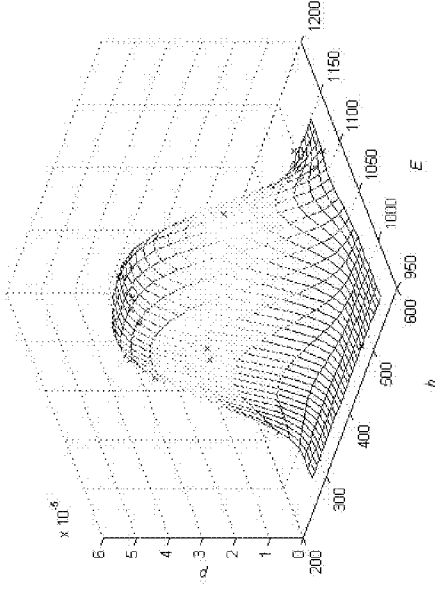
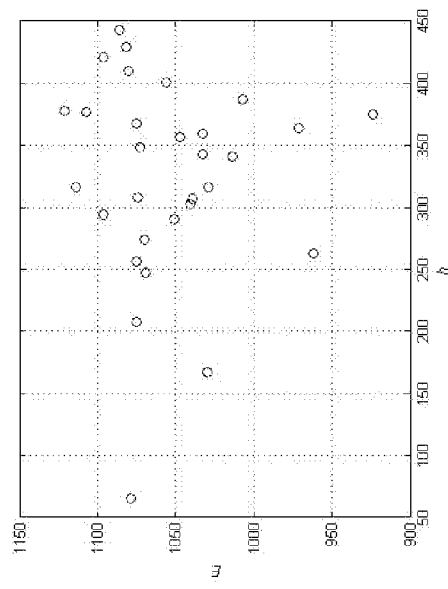
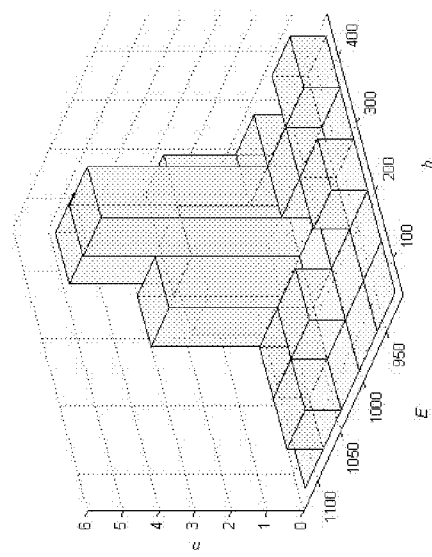


Рисунок Г.33 — 1348100

a)



б)



в)

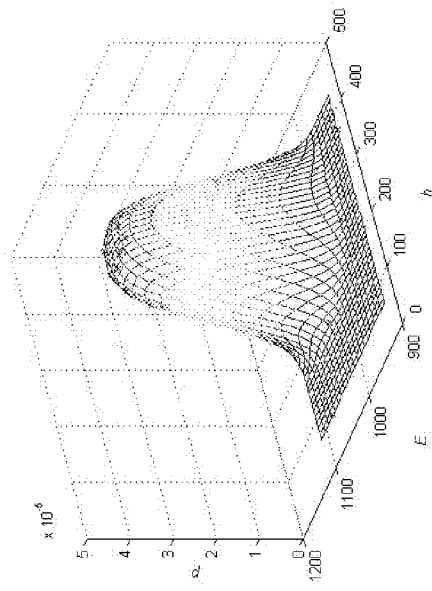
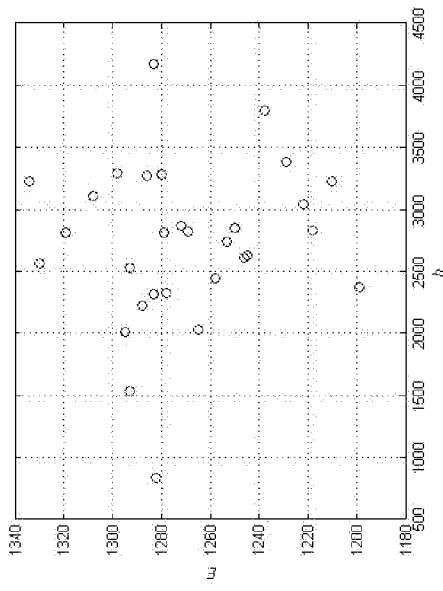
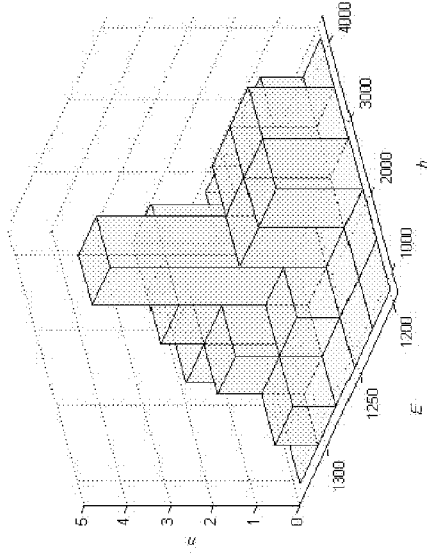


Рисунок Г.34 — 1339012

а)



б)



в)

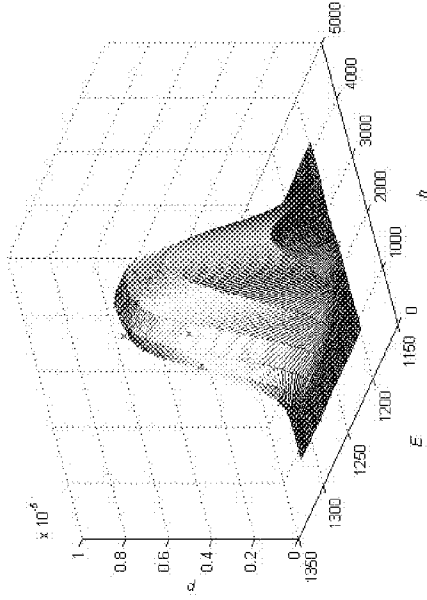
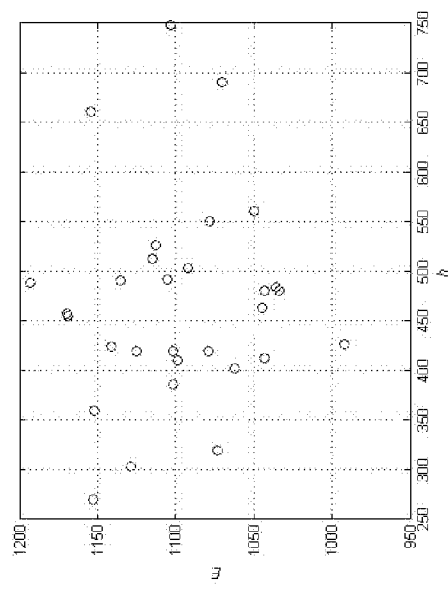
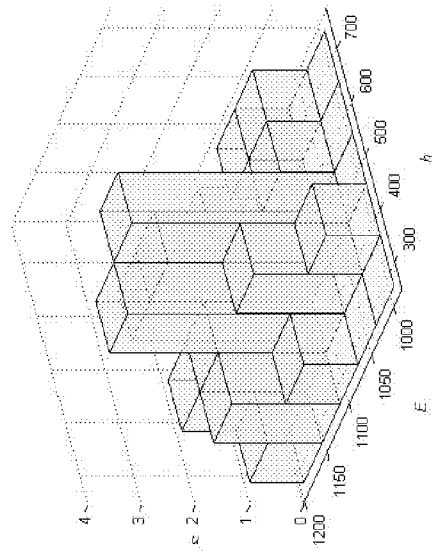


Рисунок Г.35 — 1336500

а)



б)



в)

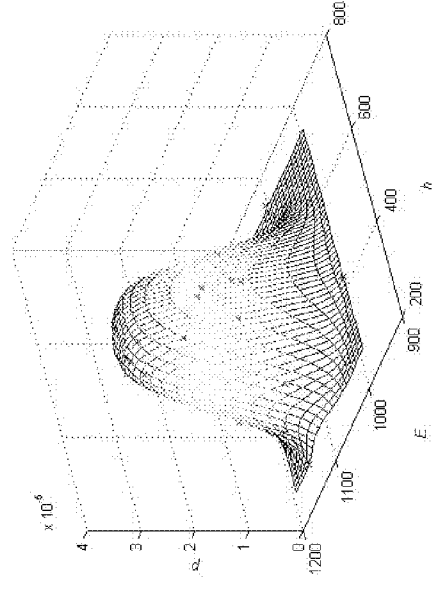
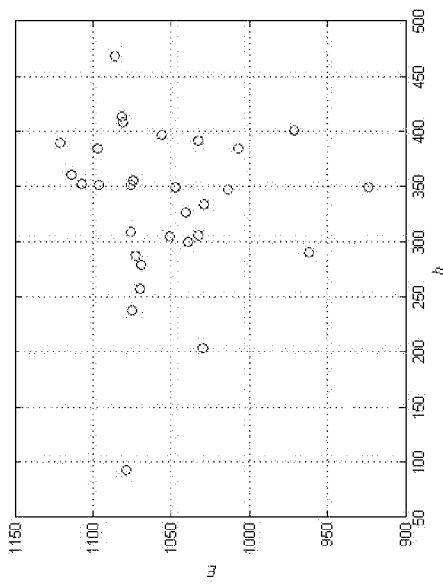
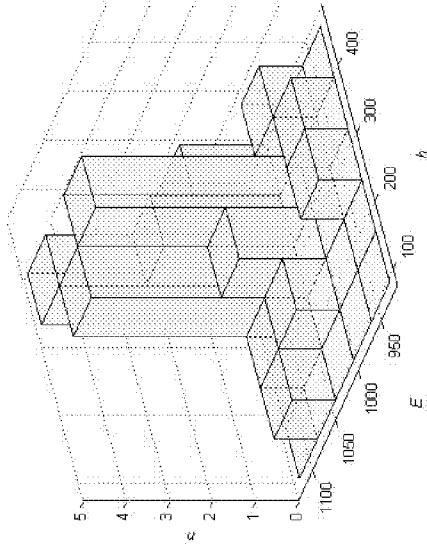


Рисунок Г.36 — 1337200

a)



б)



в)

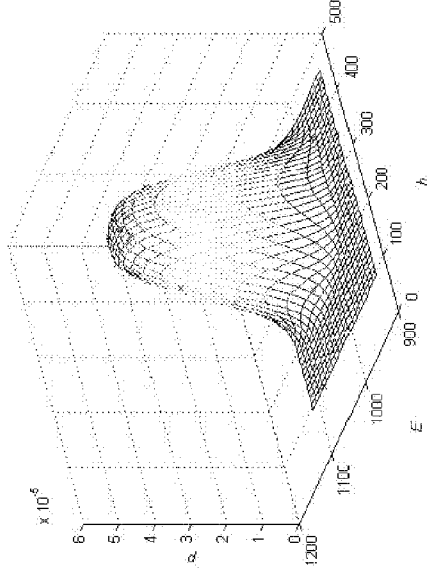
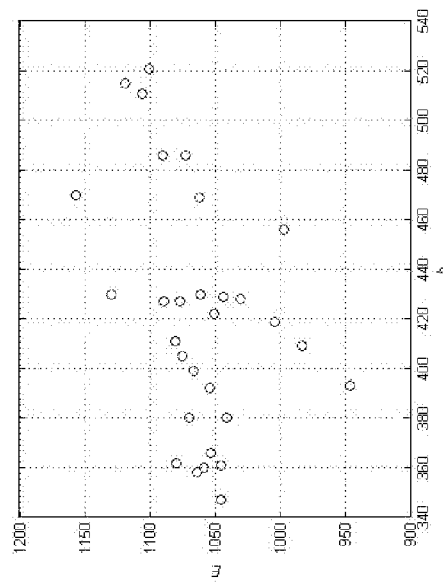
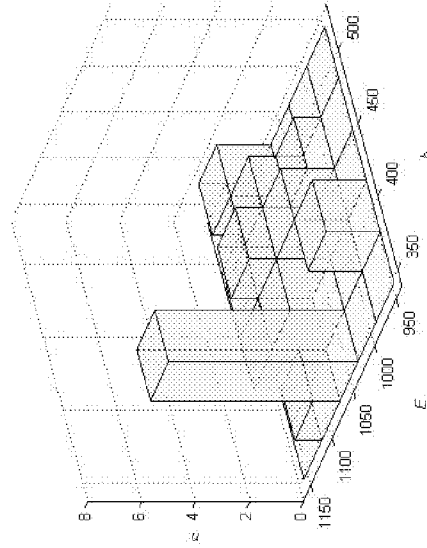


Рисунок Г.37 — 1339011

a)



б)



в)

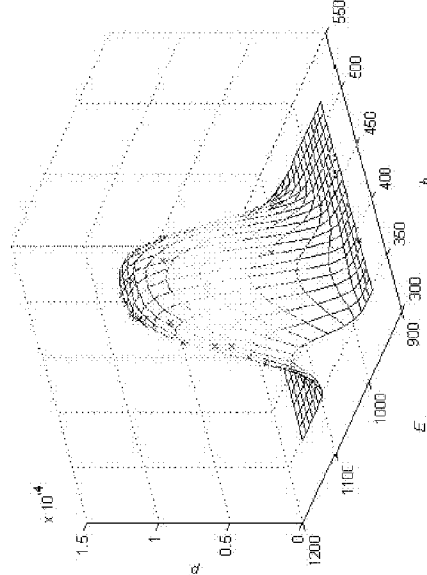
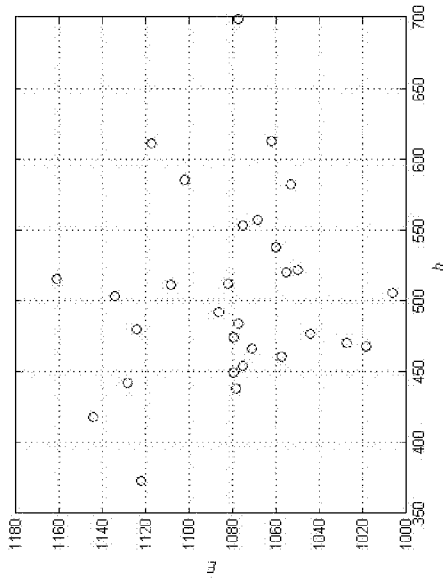
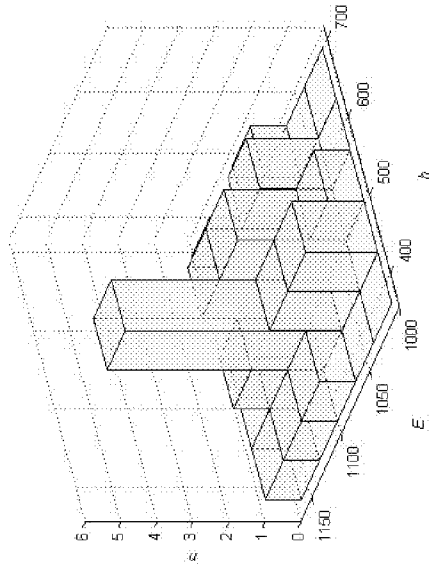


Рисунок Г.38 — 1348151

а)



б)



в)

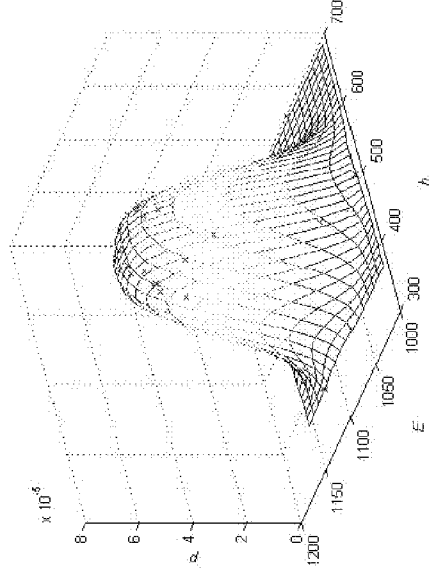
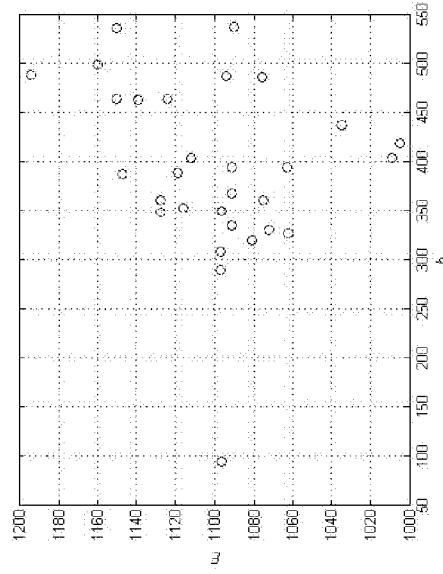
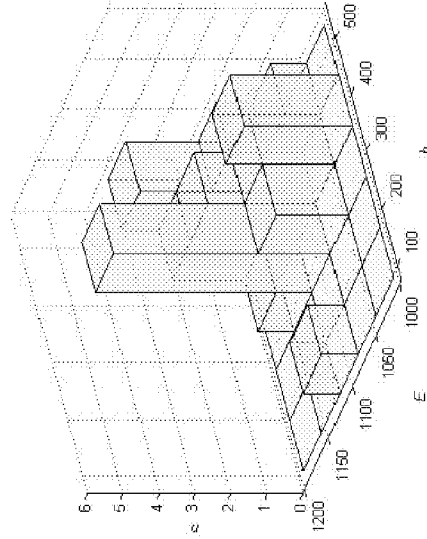


Рисунок Г.39 — 1338201

а)



б)



в)

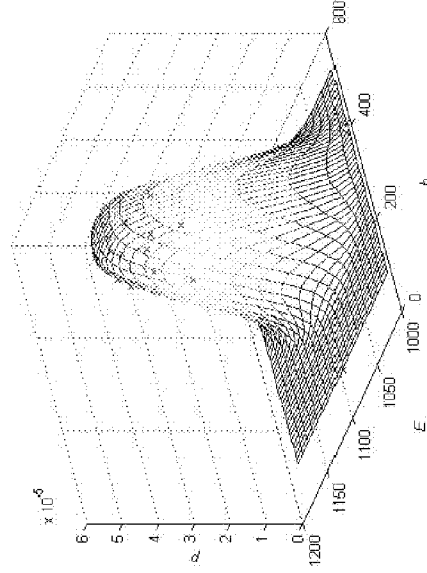
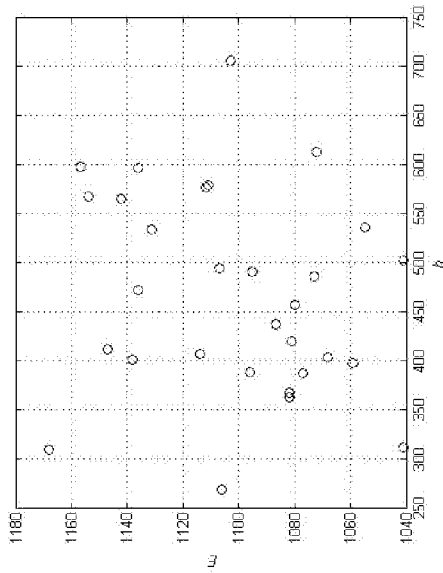
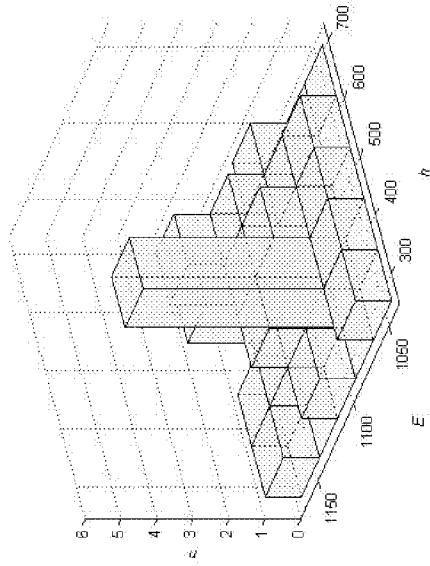


Рисунок Г.40 — 1339015

a)



б)



в)

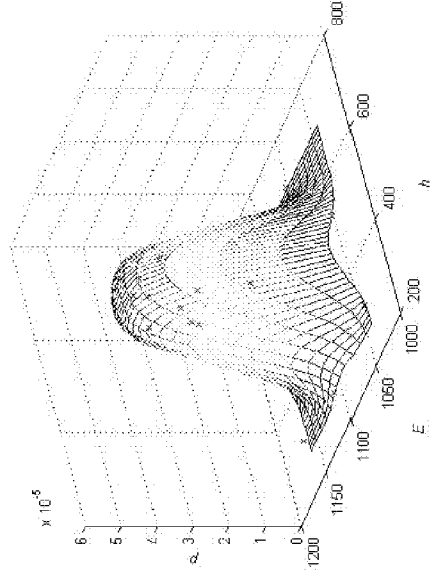
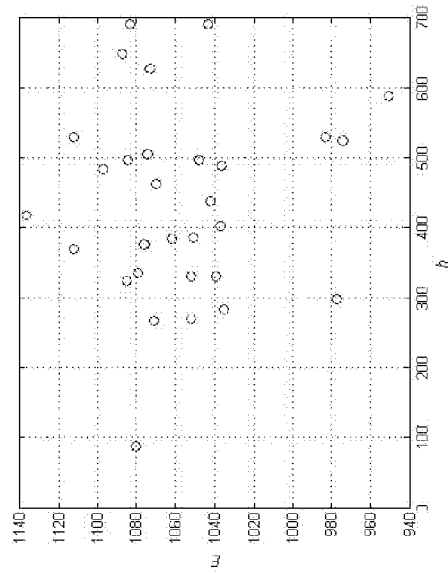
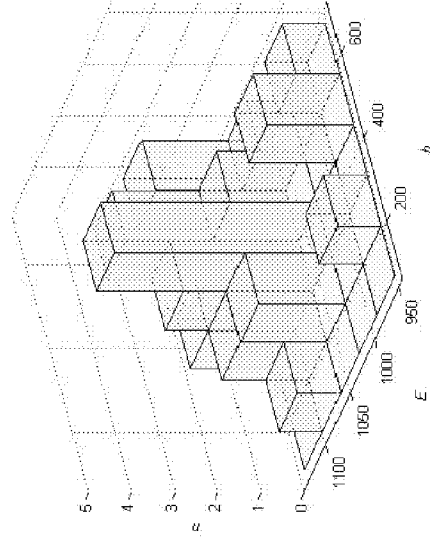


Рисунок Г.41 – 1340500

a)



б)



в)

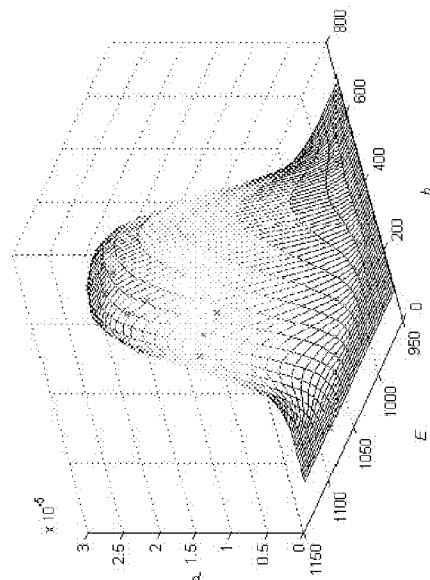
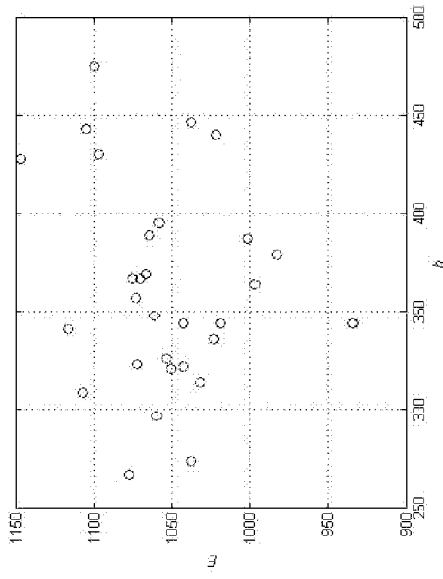
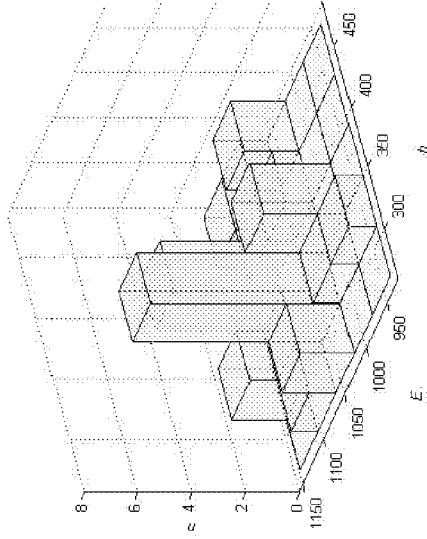


Рисунок Г.42 – 1339017

а)



б)



в)

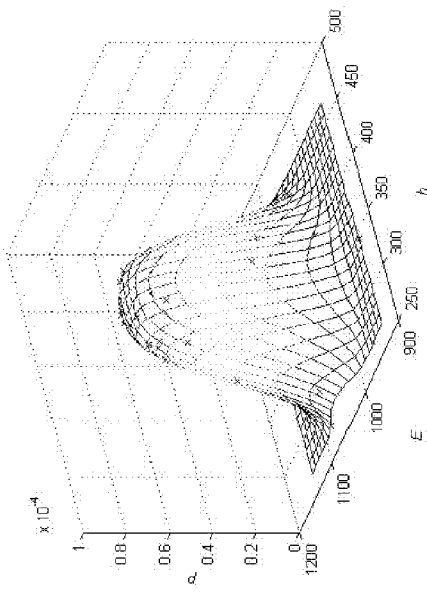
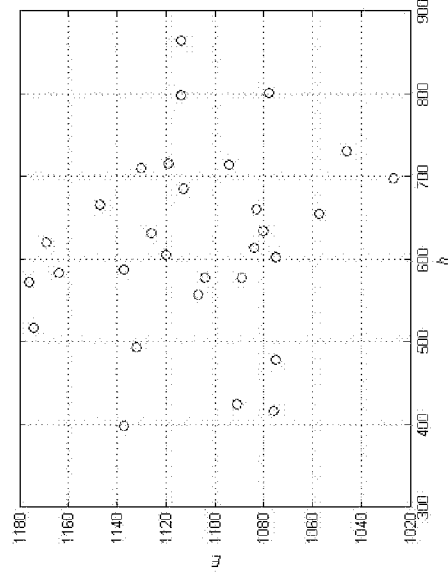
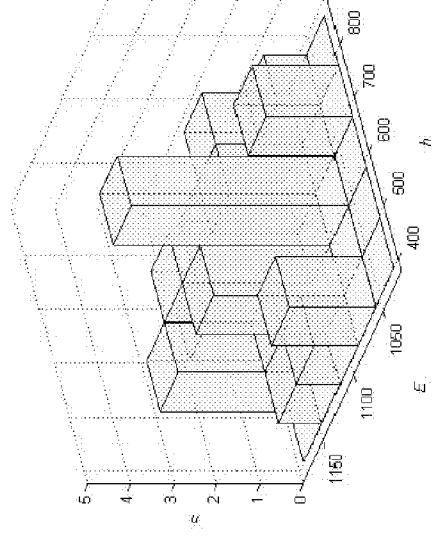


Рисунок Г.43 – 1348152

а)



б)



в)

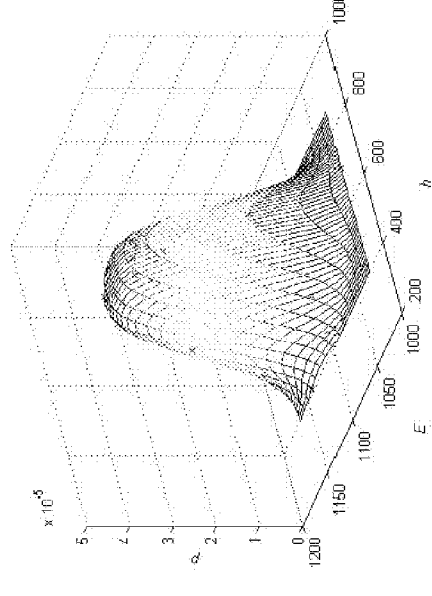
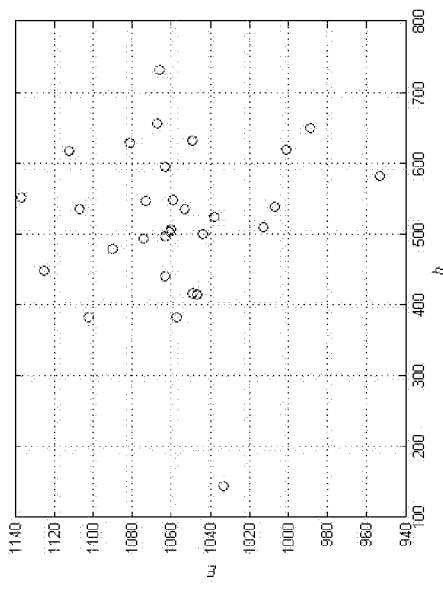
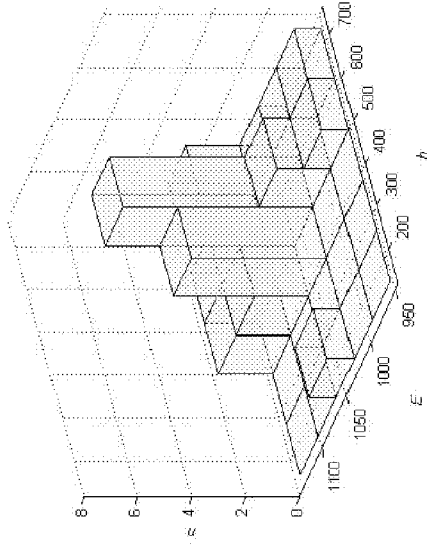


Рисунок Г.44 – 1338600

a)



б)



в)

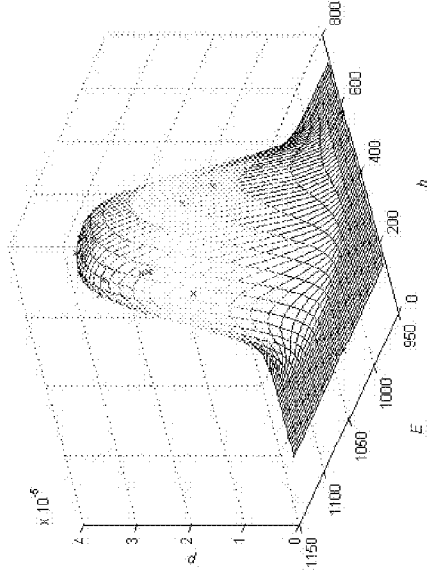
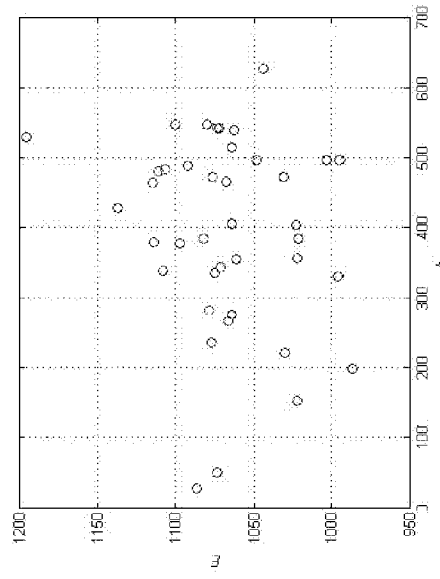
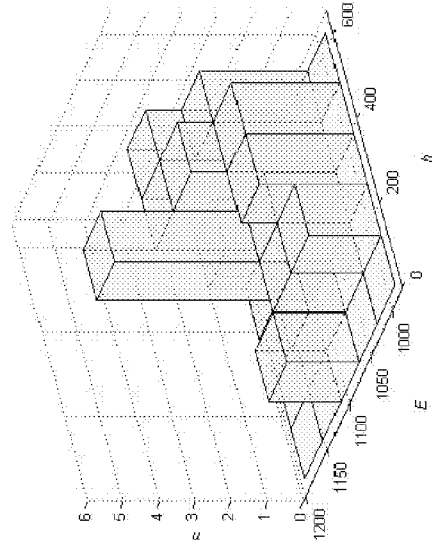


Рисунок Г.45 – 1338300

a)



б)



в)

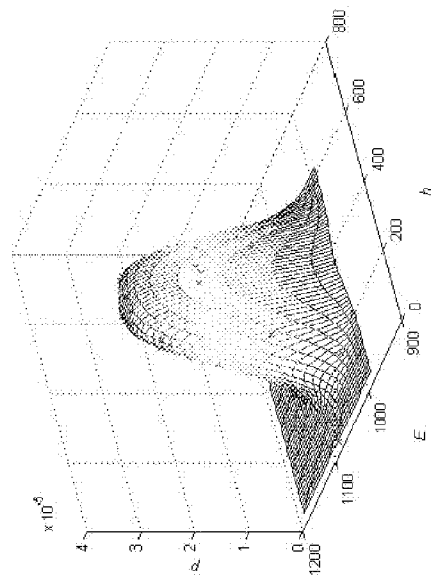
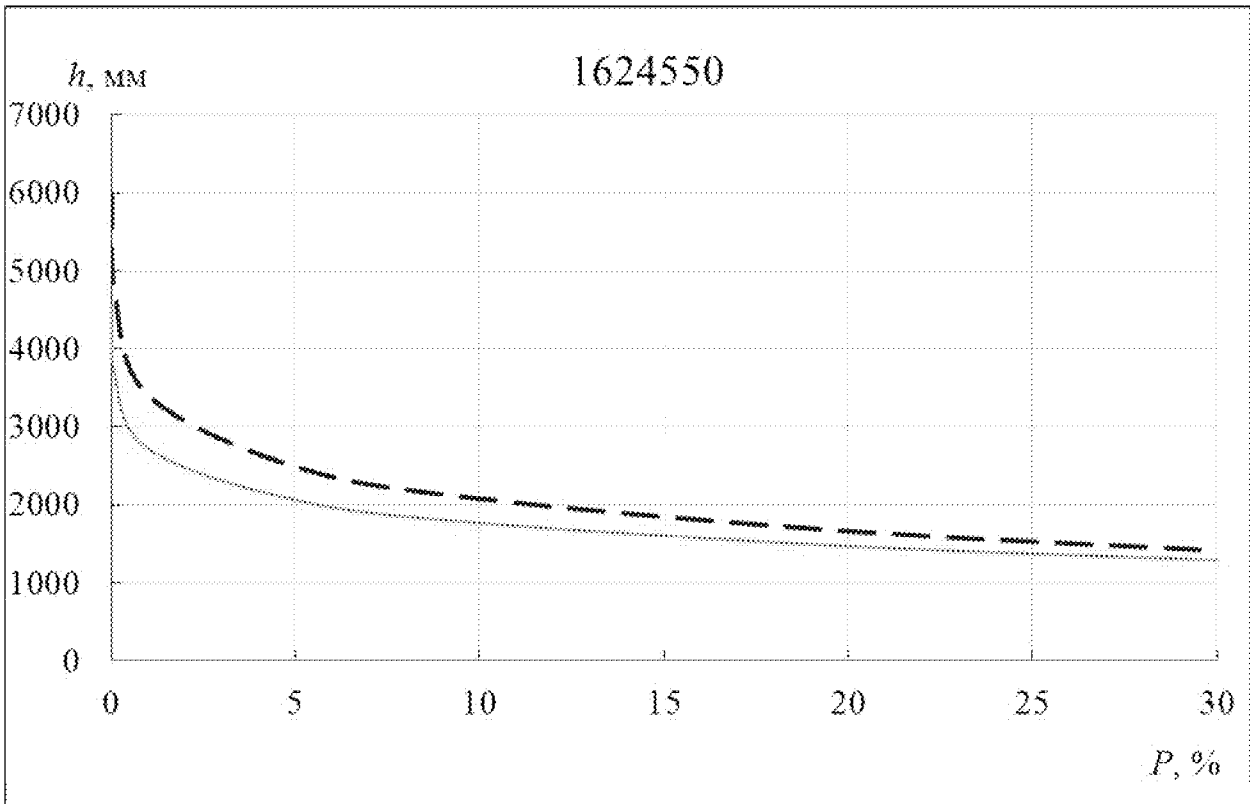


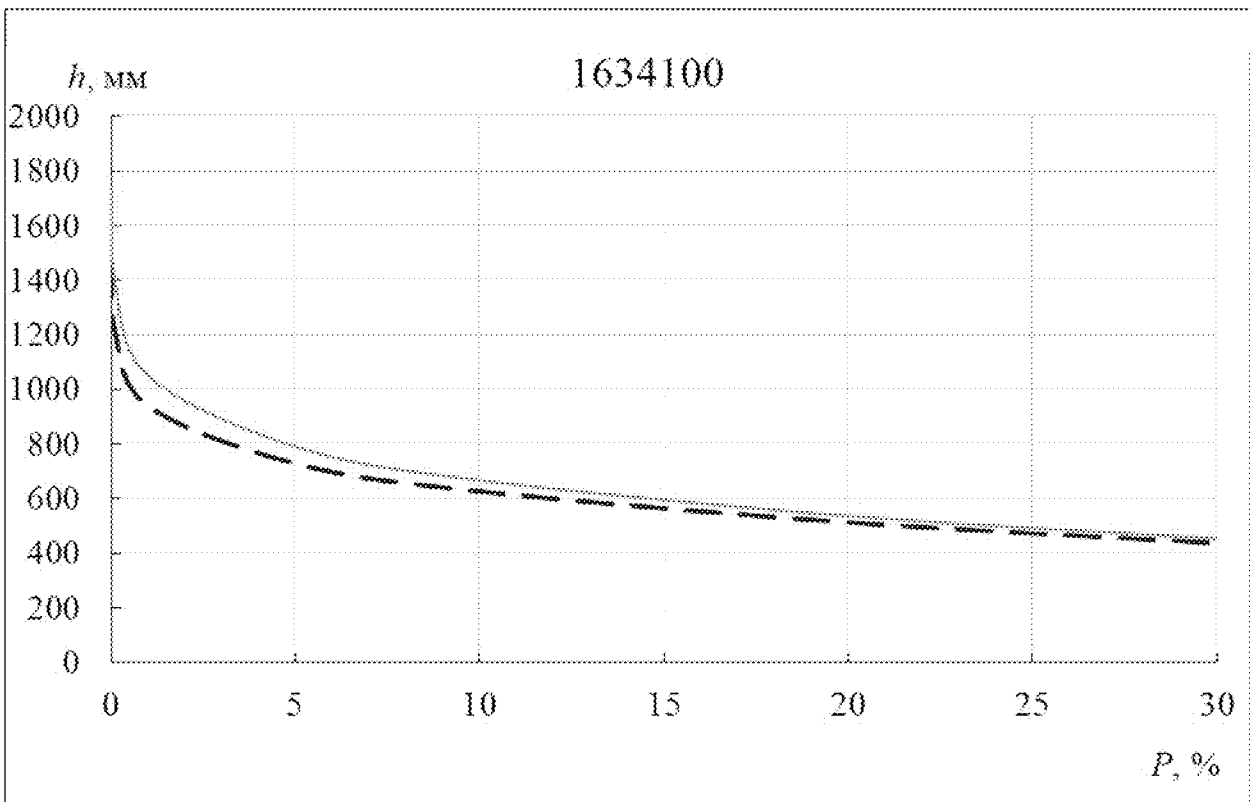
Рисунок Г.46 – 1537180

ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Условные и безусловные кривые обеспеченности

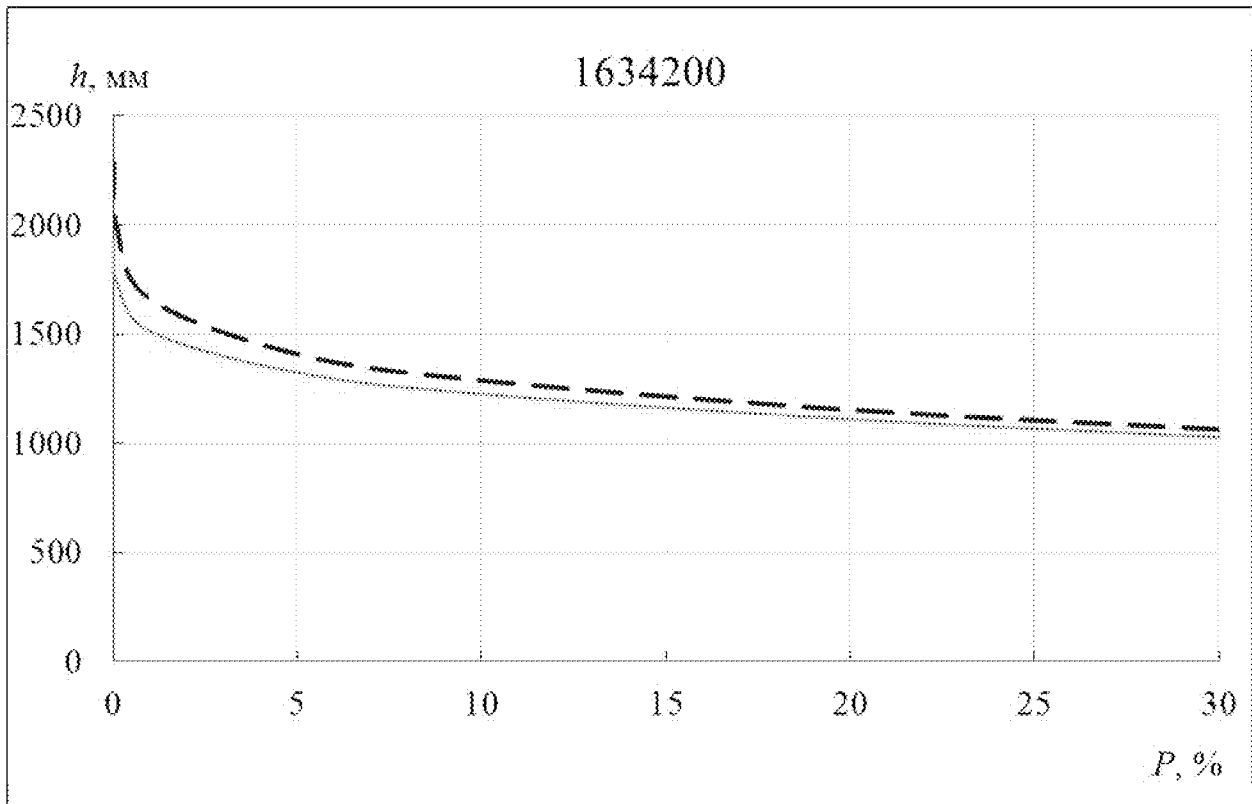
a)



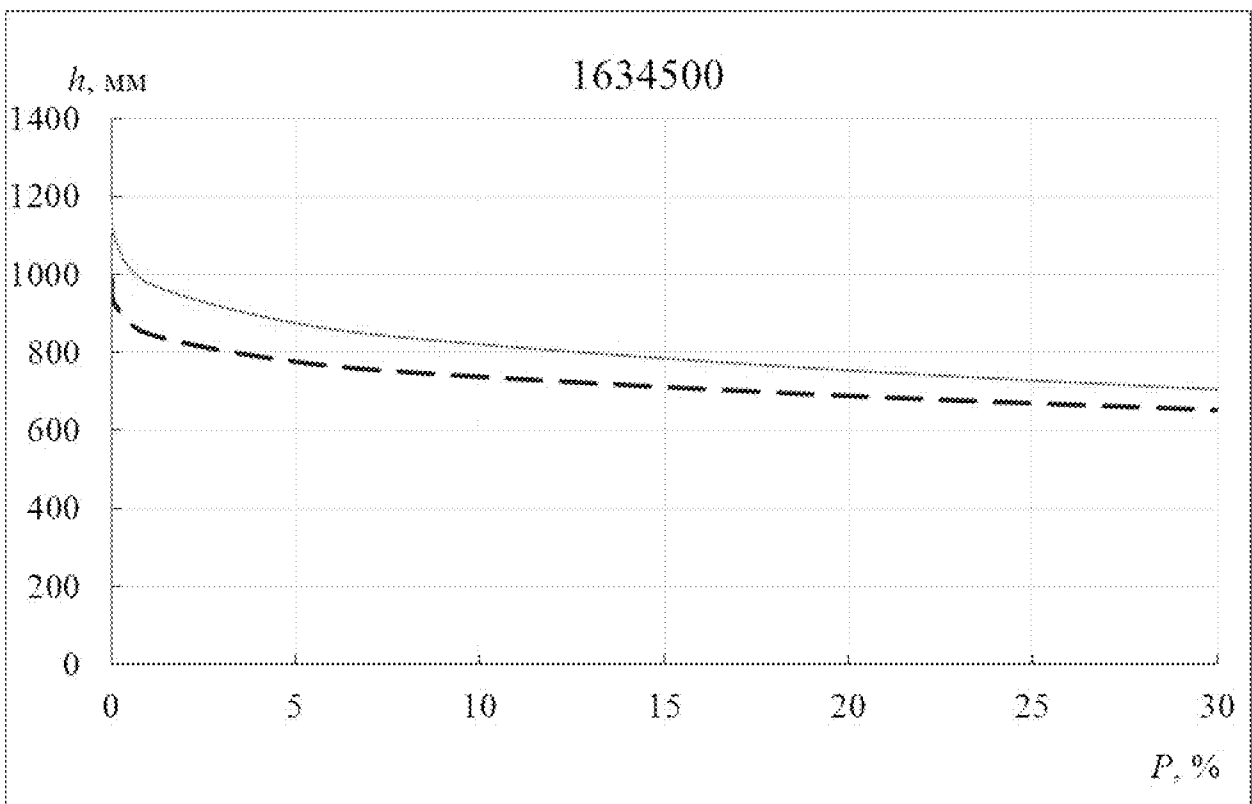
b)



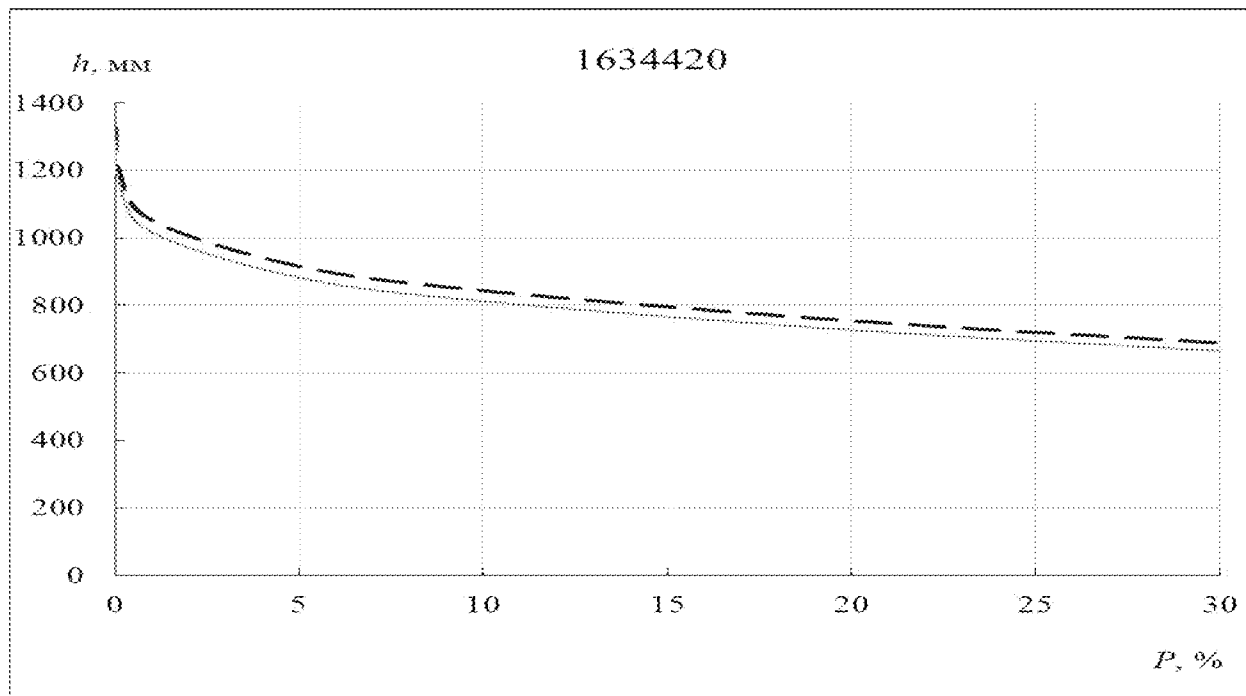
6)



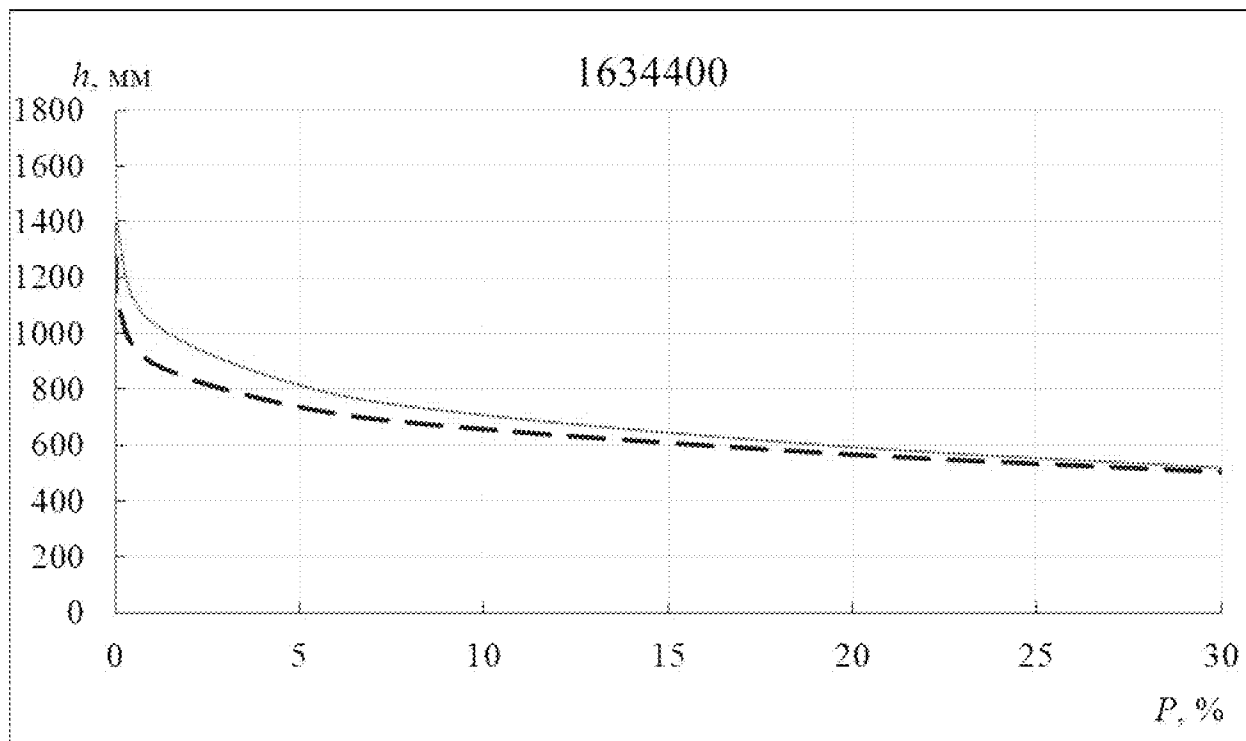
2)



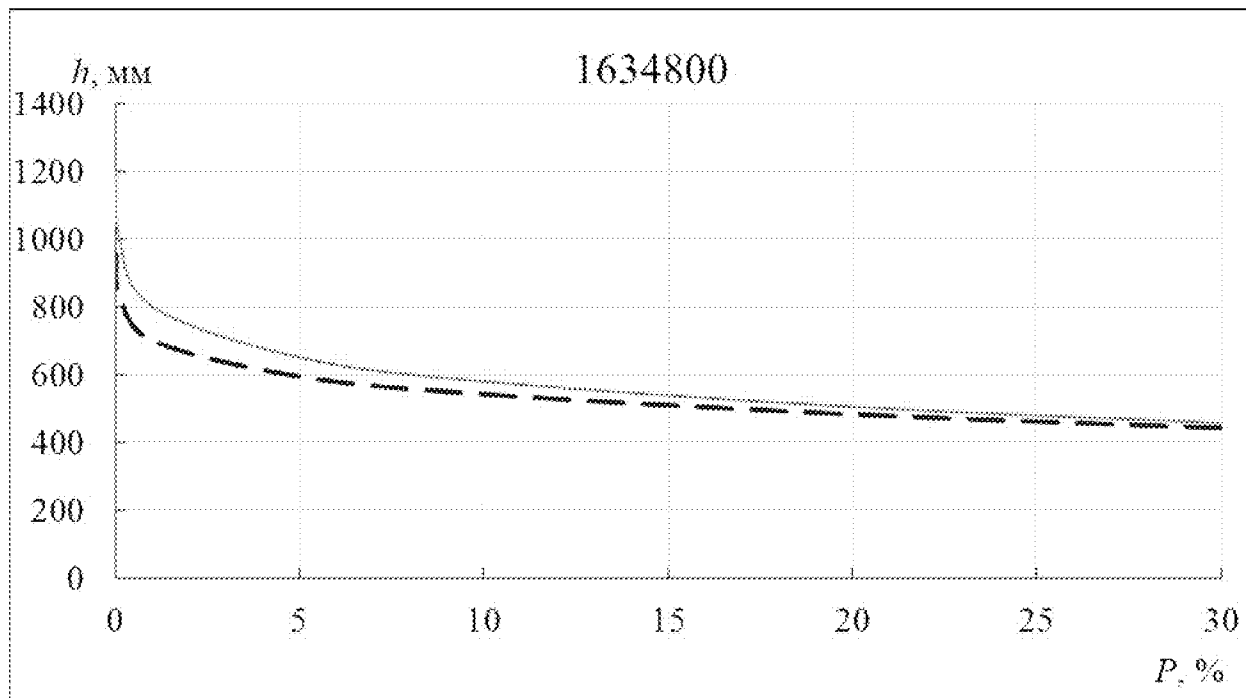
d)



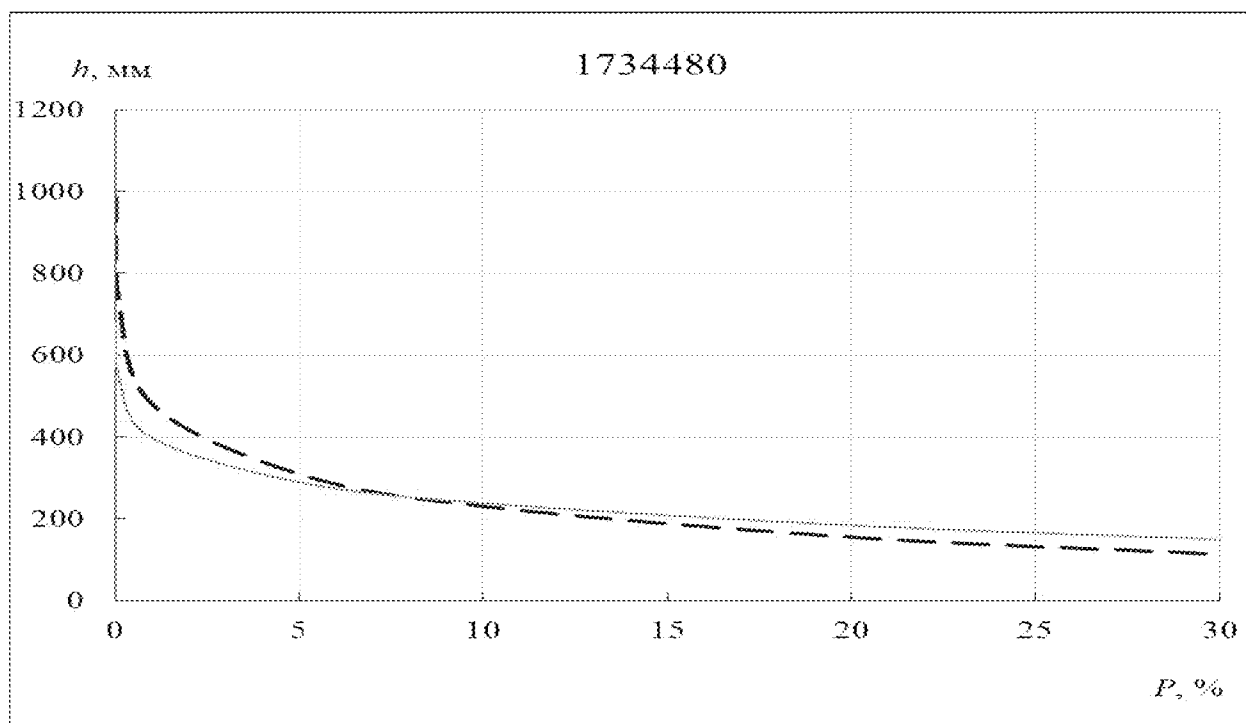
e)



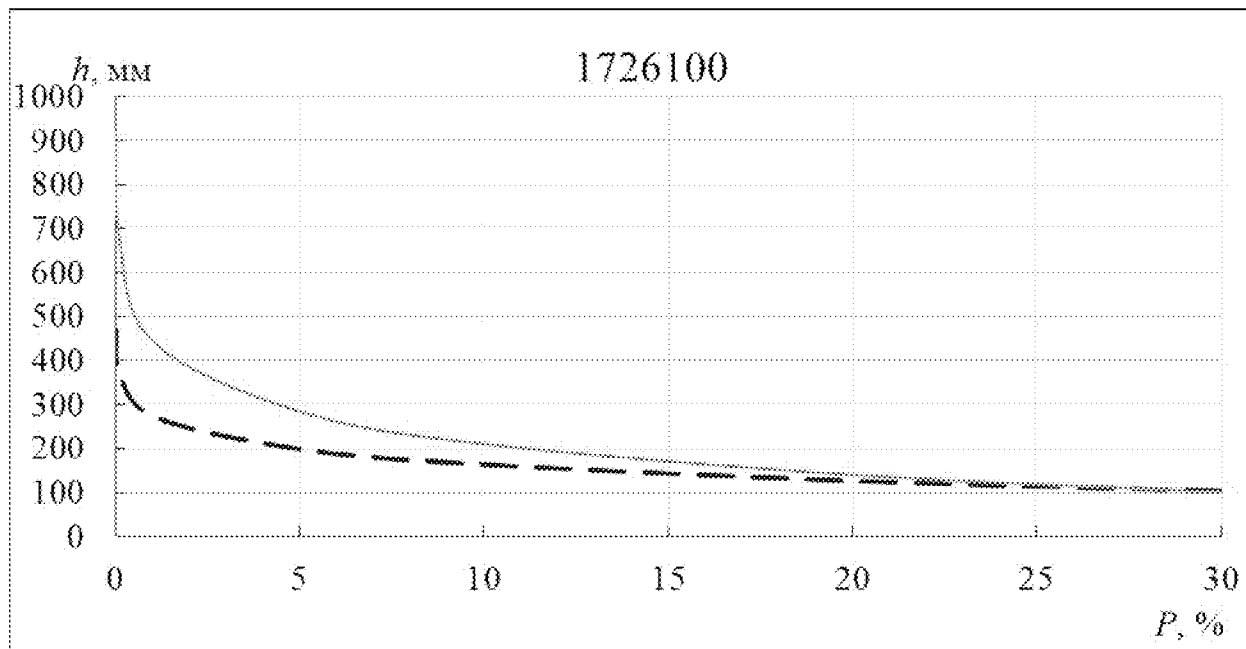
o(c)



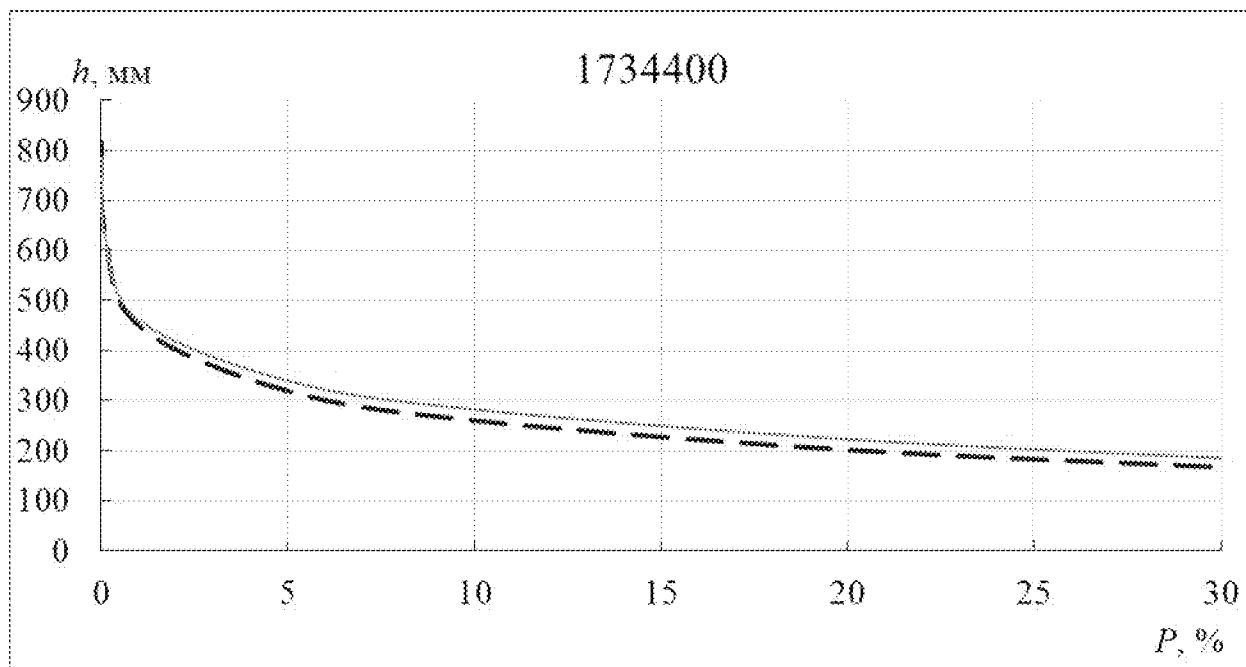
u)



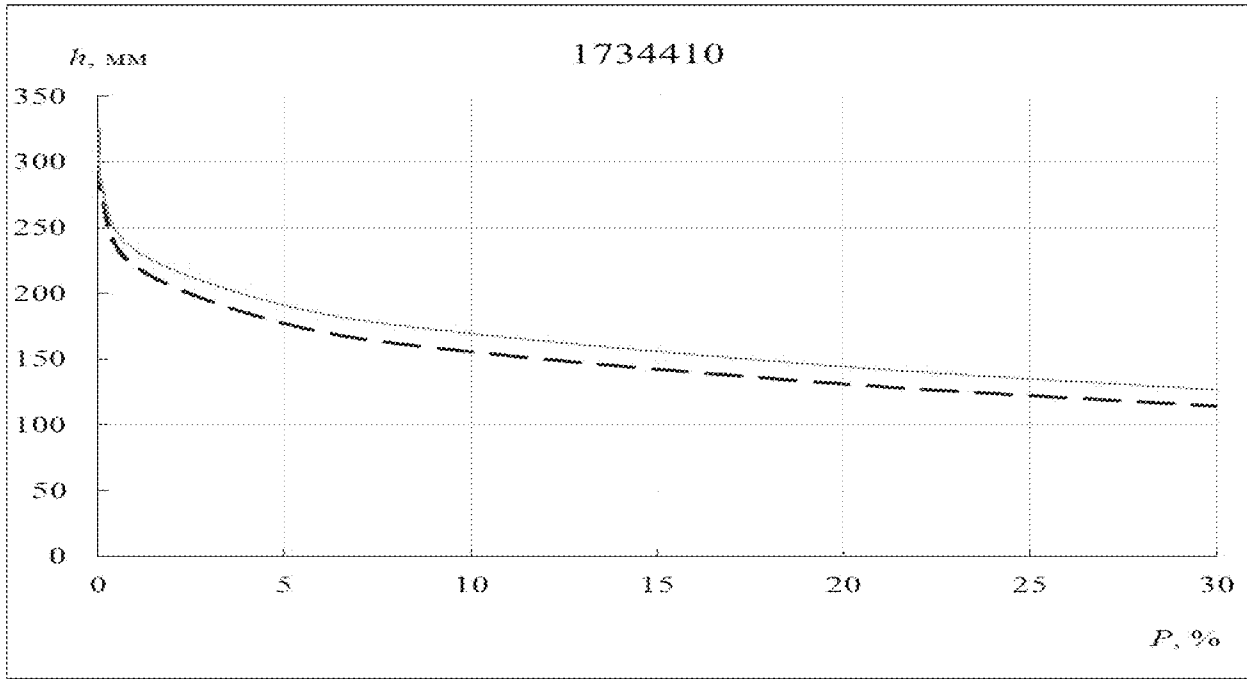
κ)



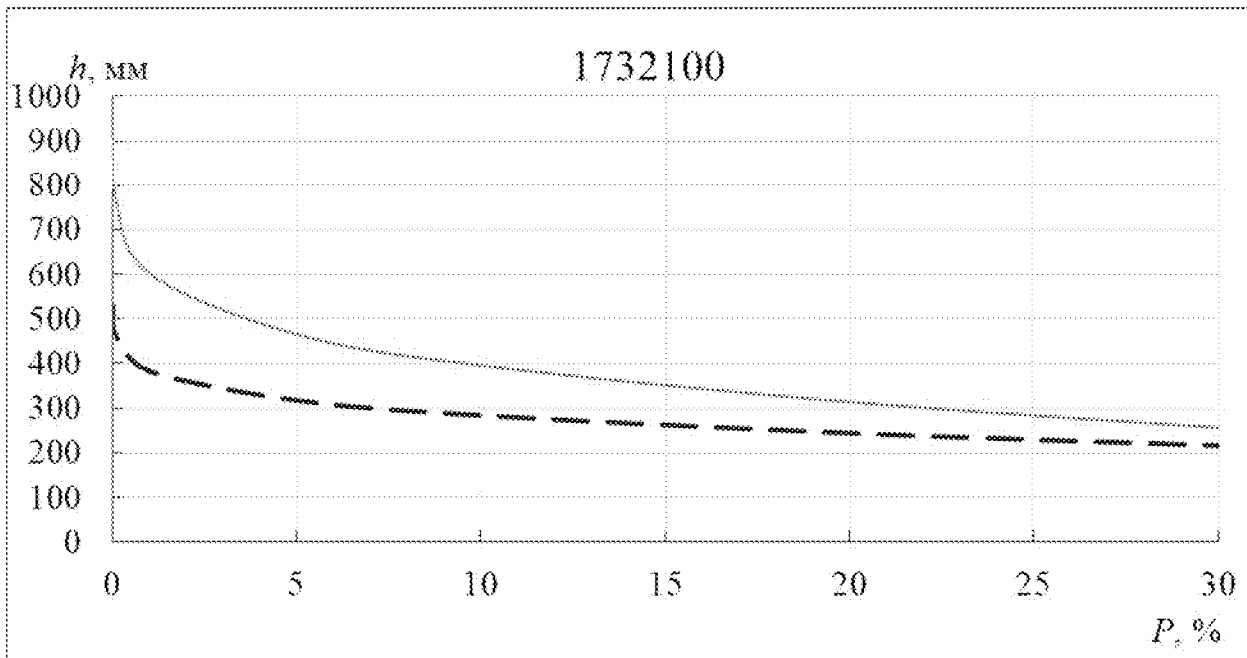
λ)



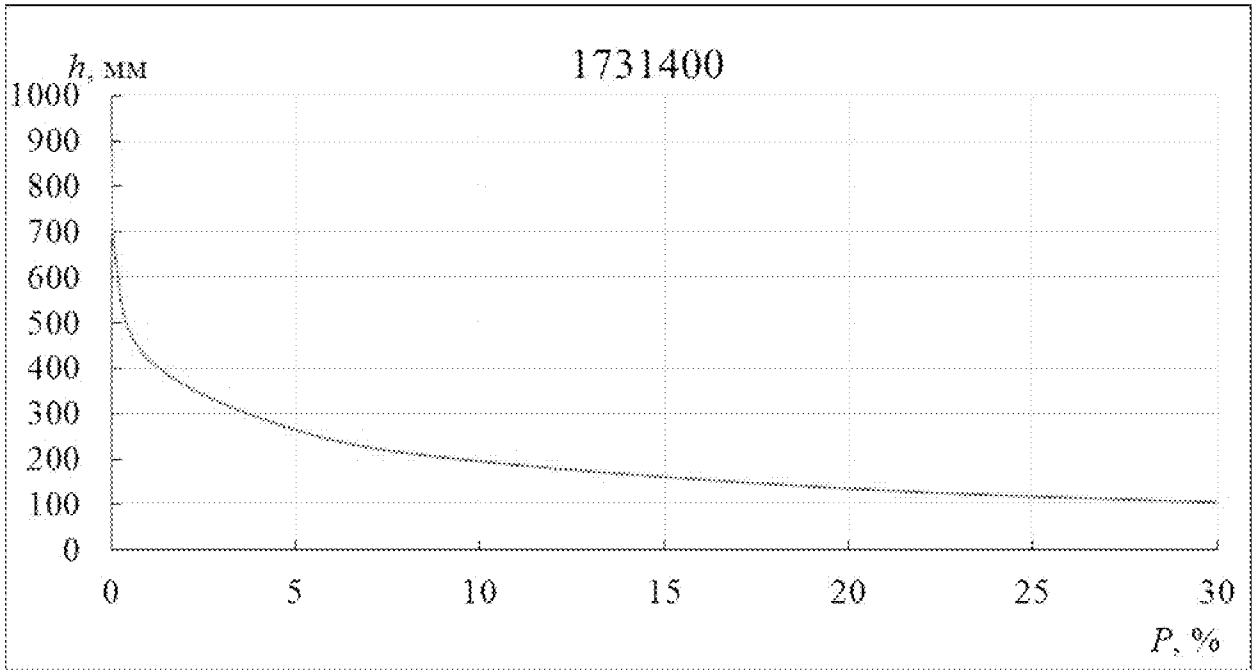
M)



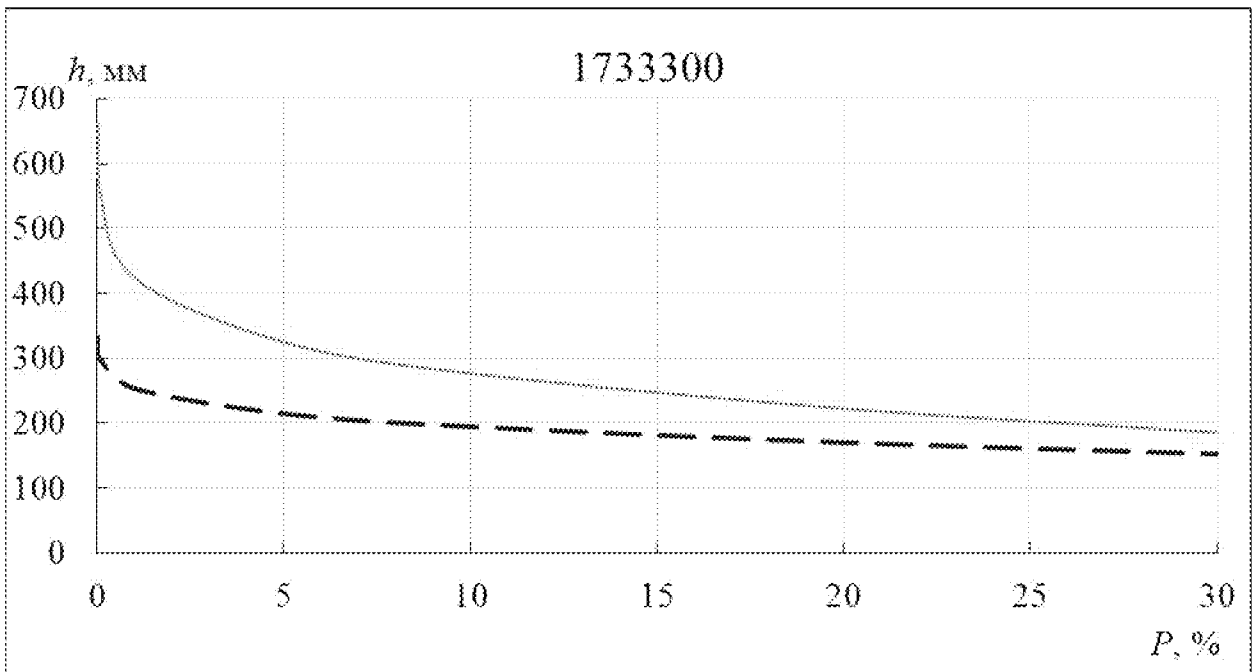
H)



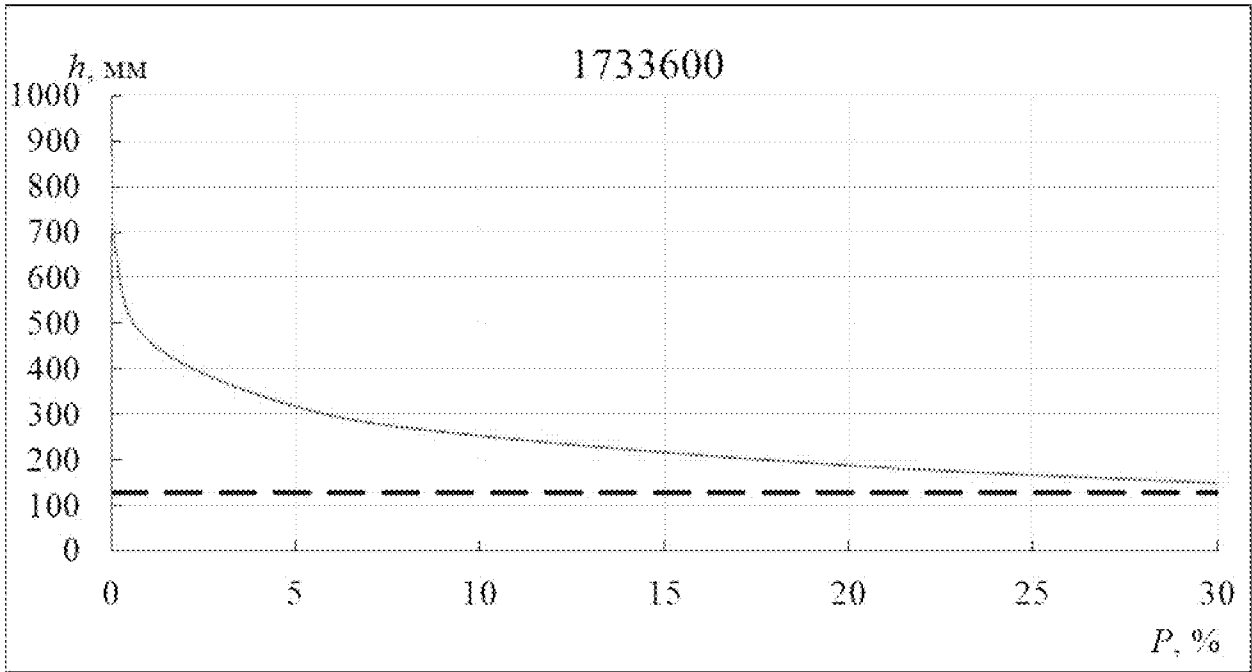
o)



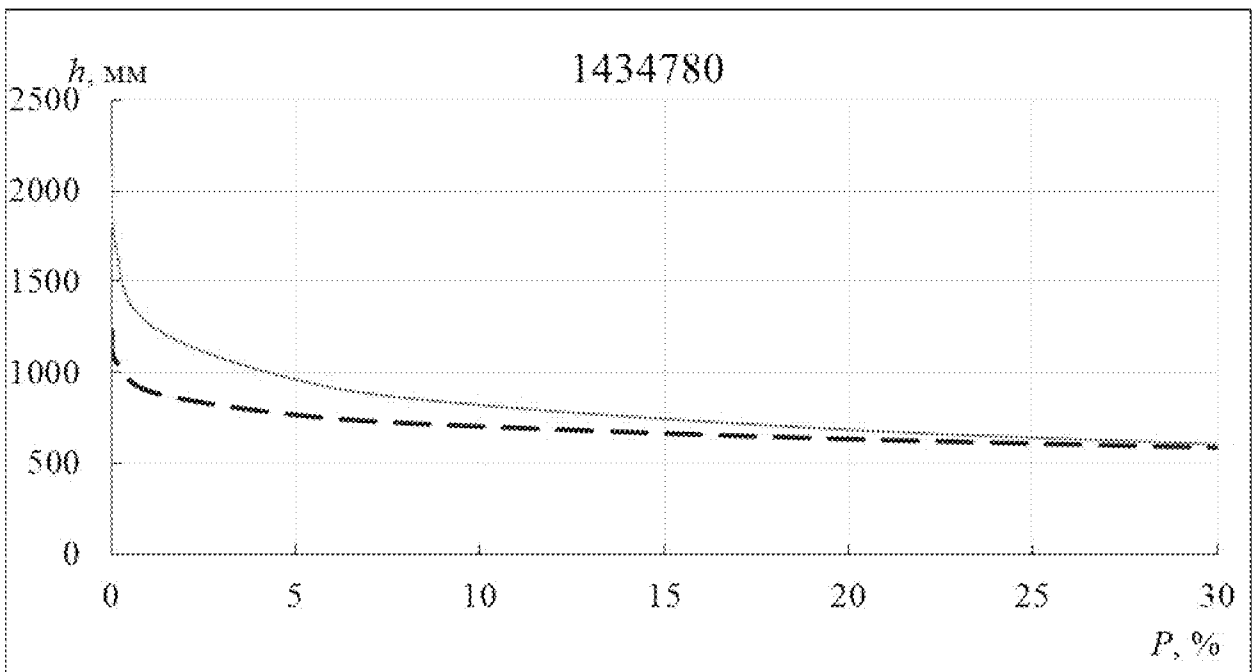
n)



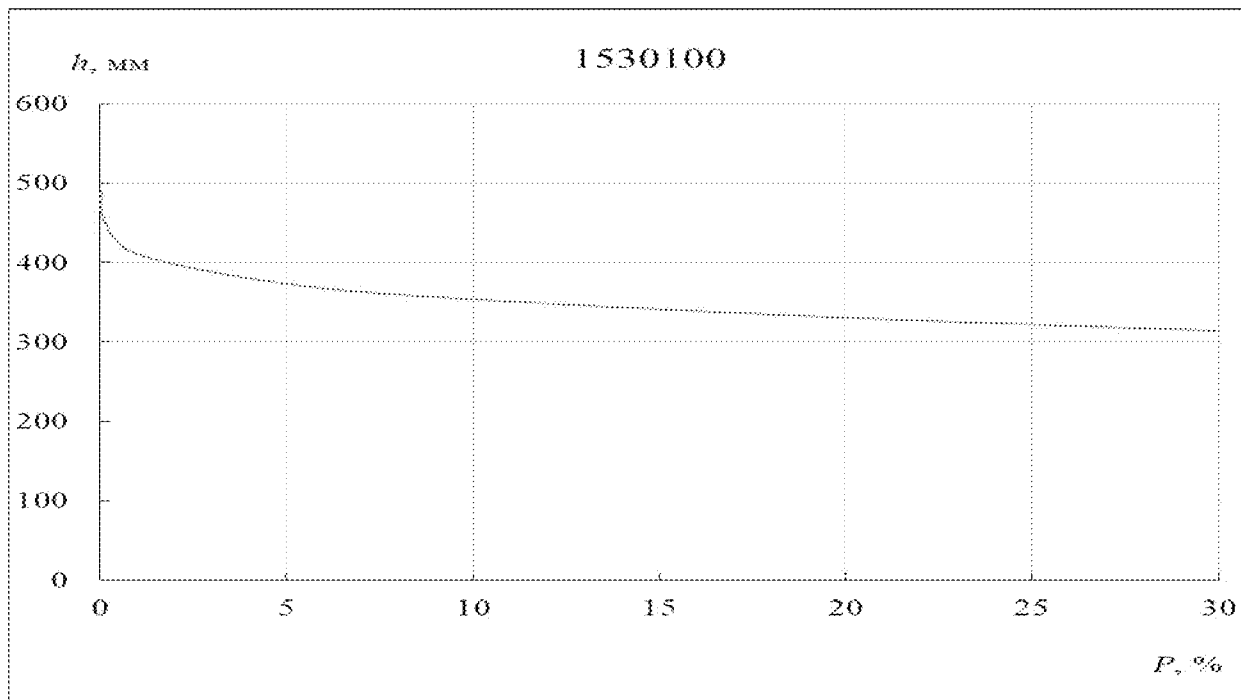
p)



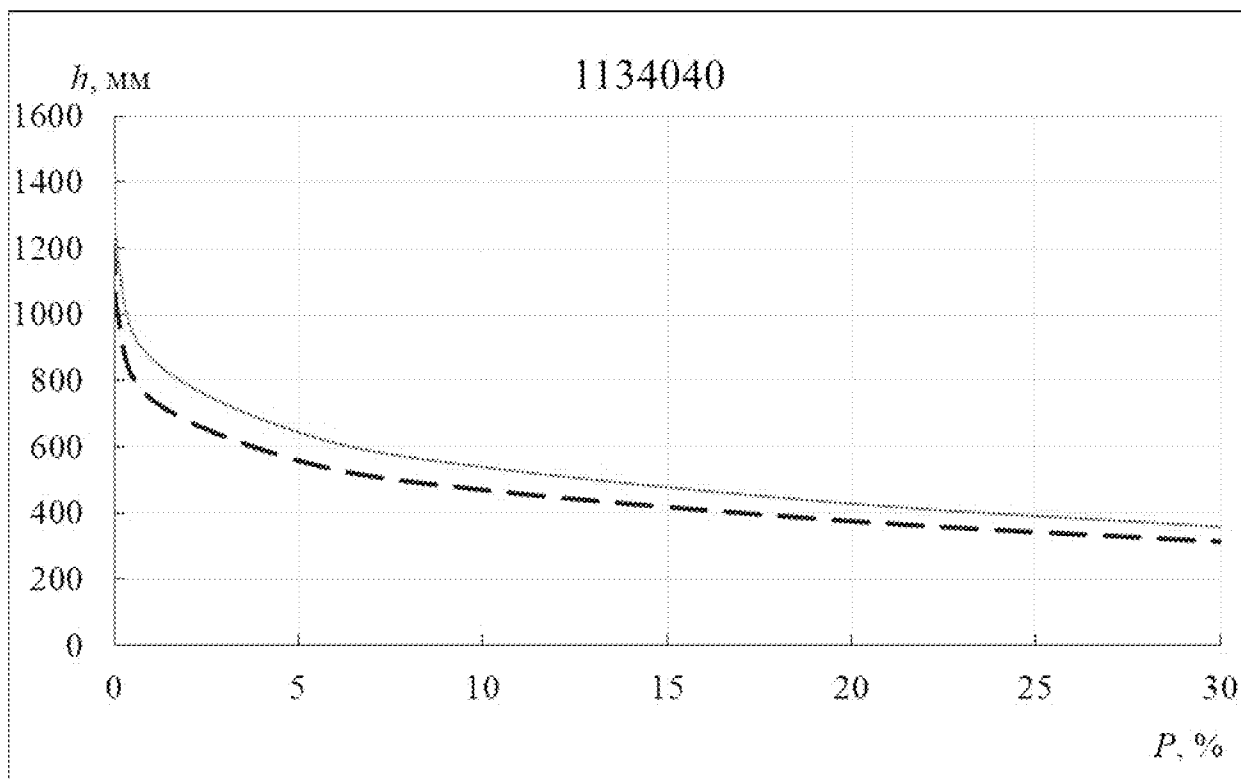
c)



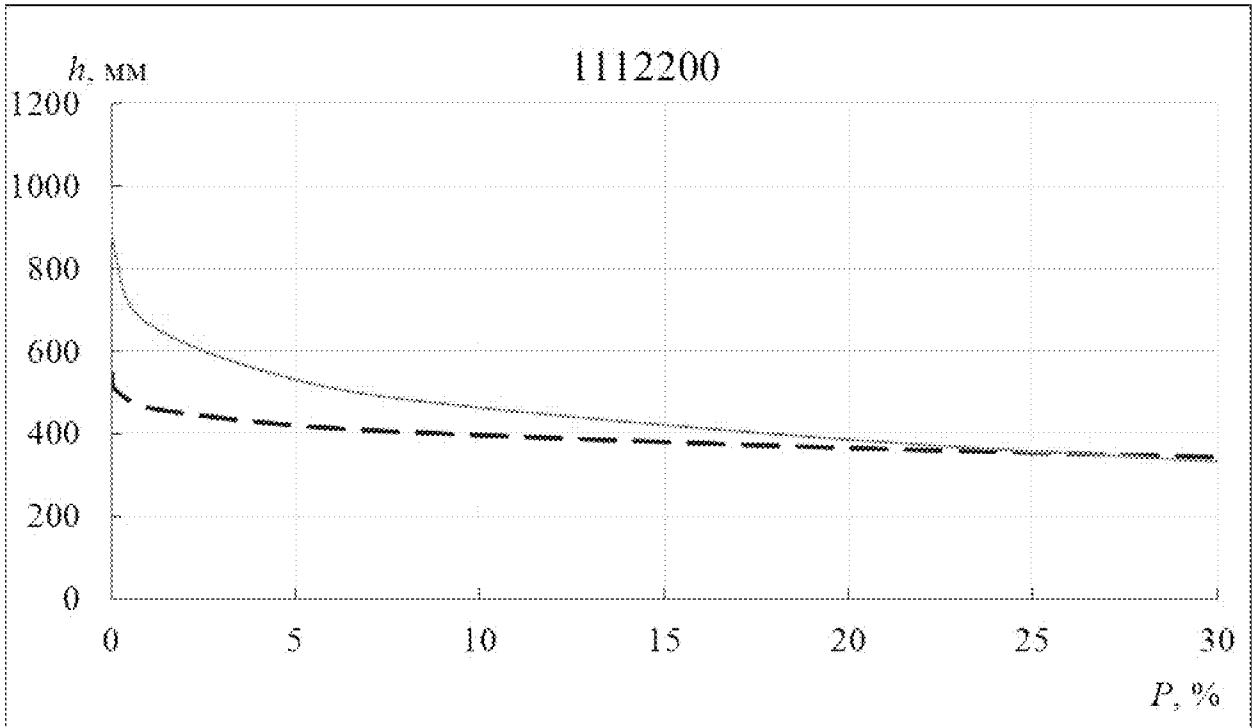
m)



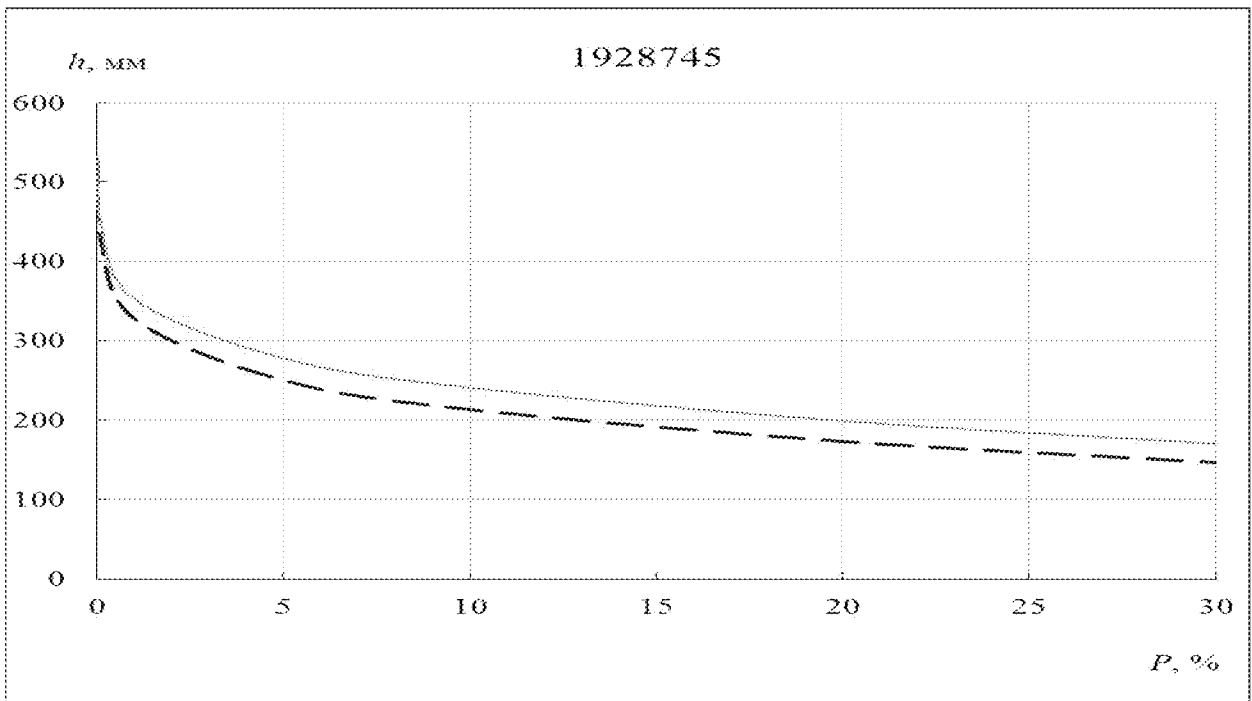
y)



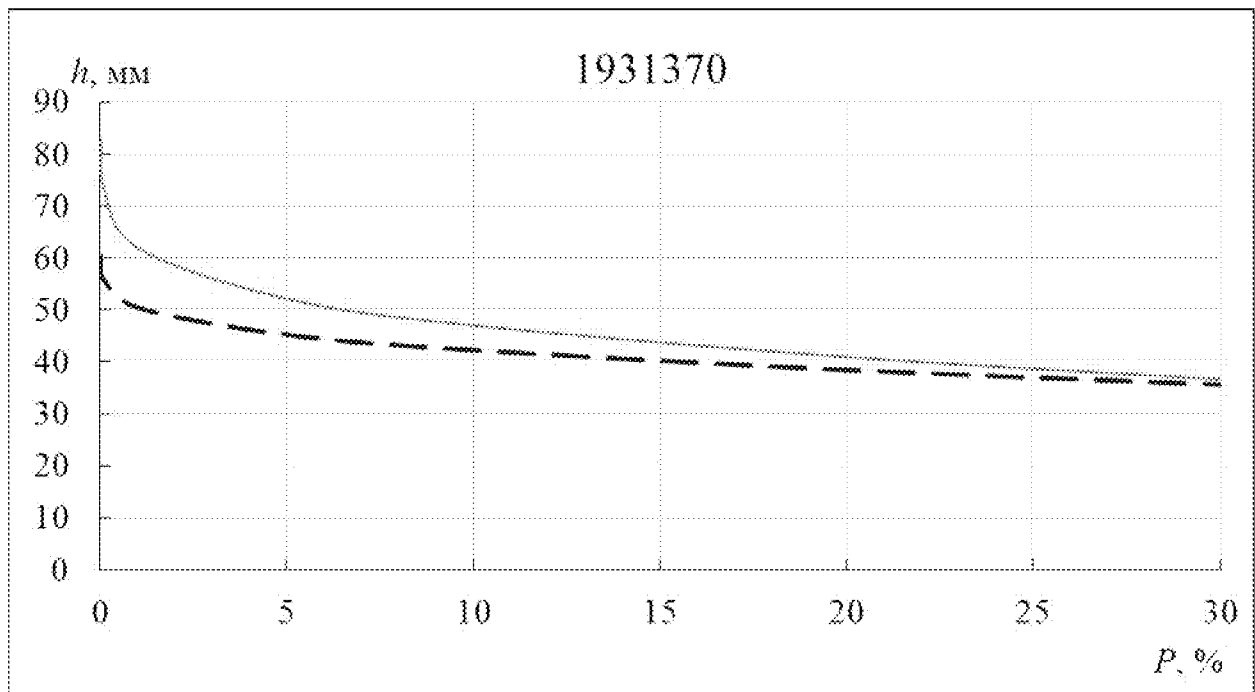
φ)



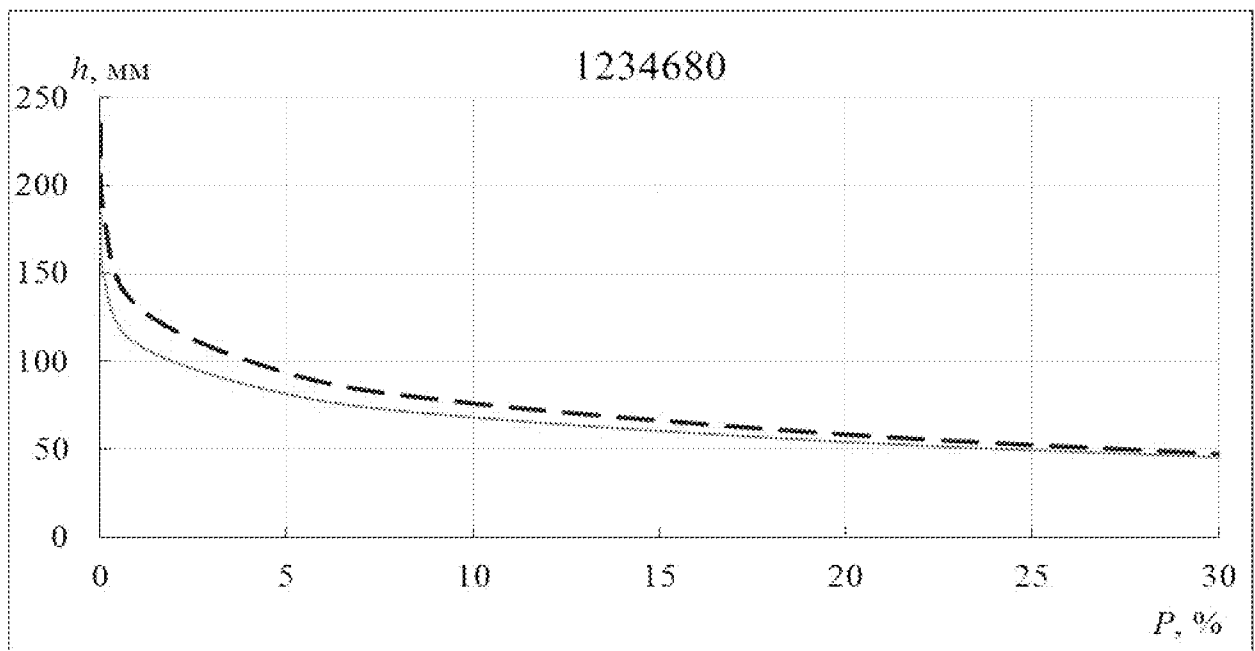
x)



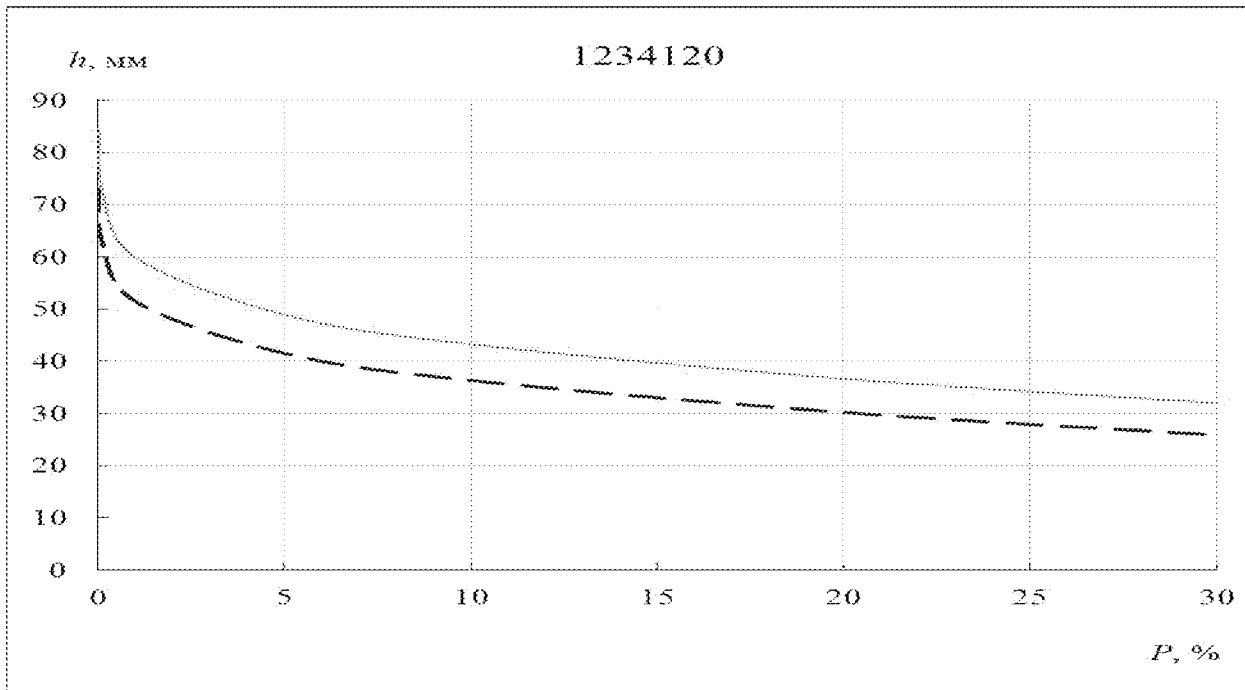
у)



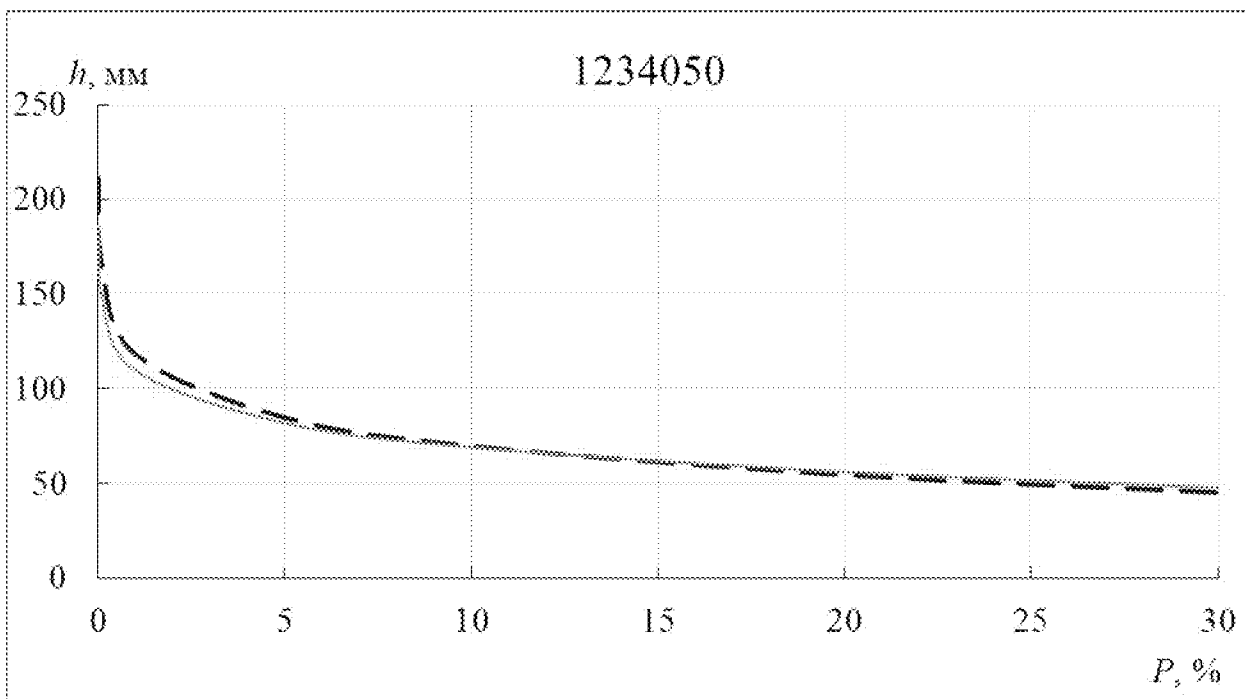
у)



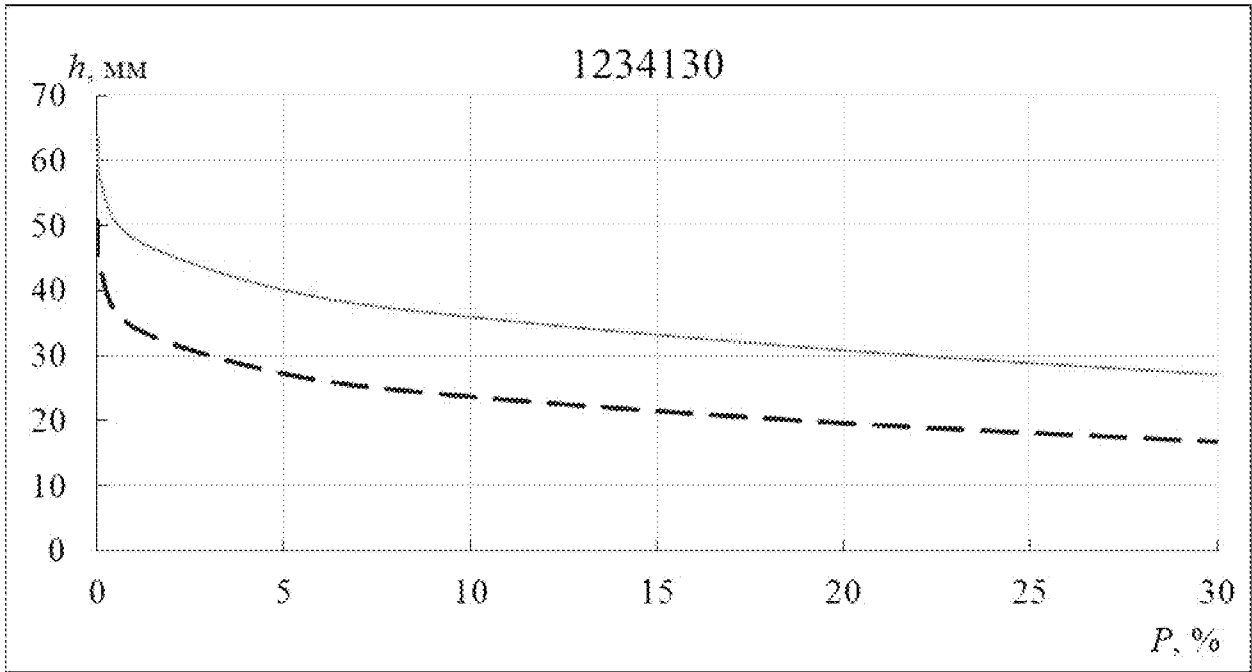
u)



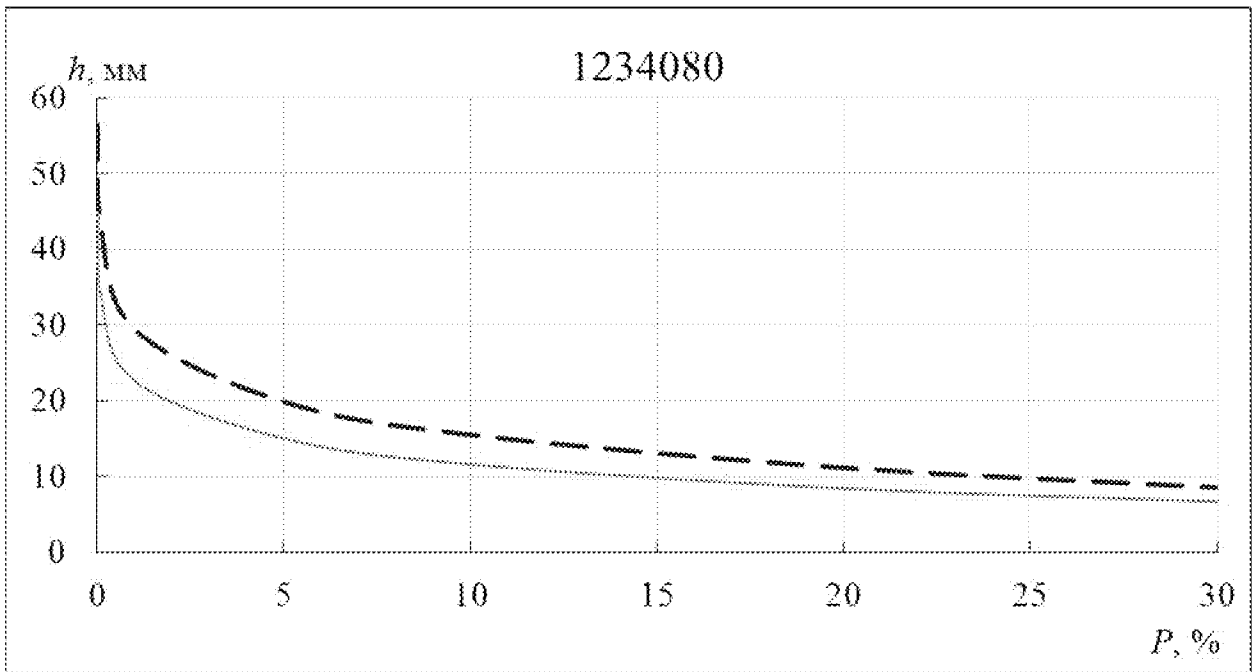
u)



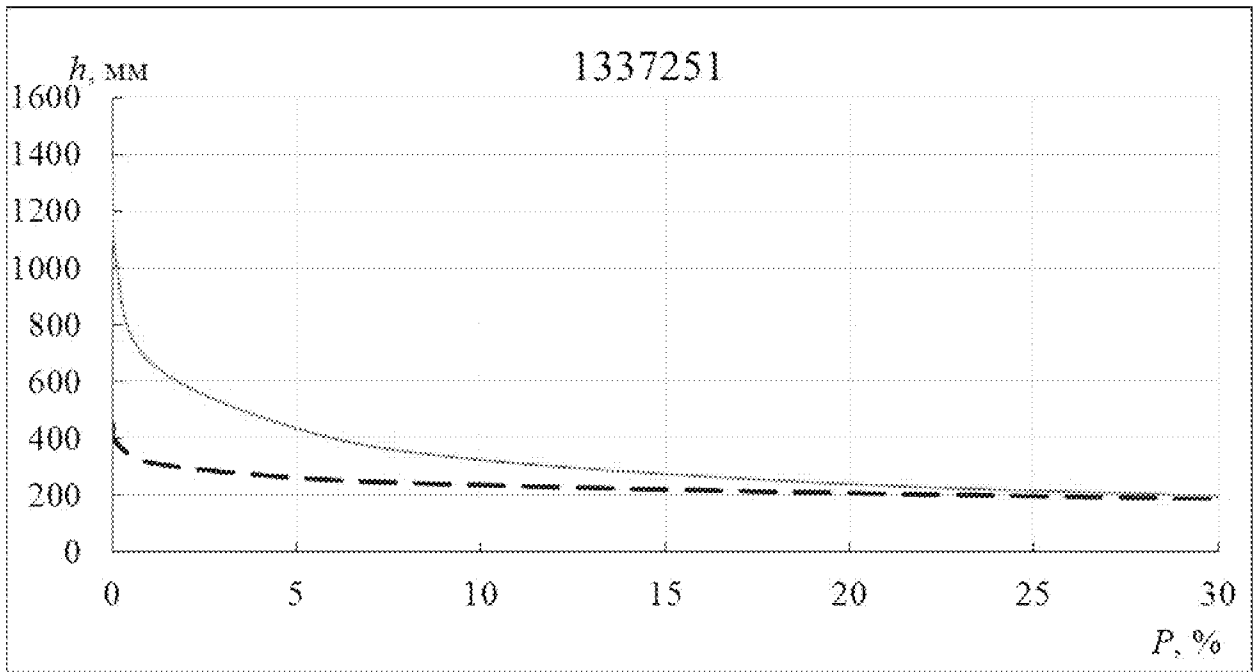
9)



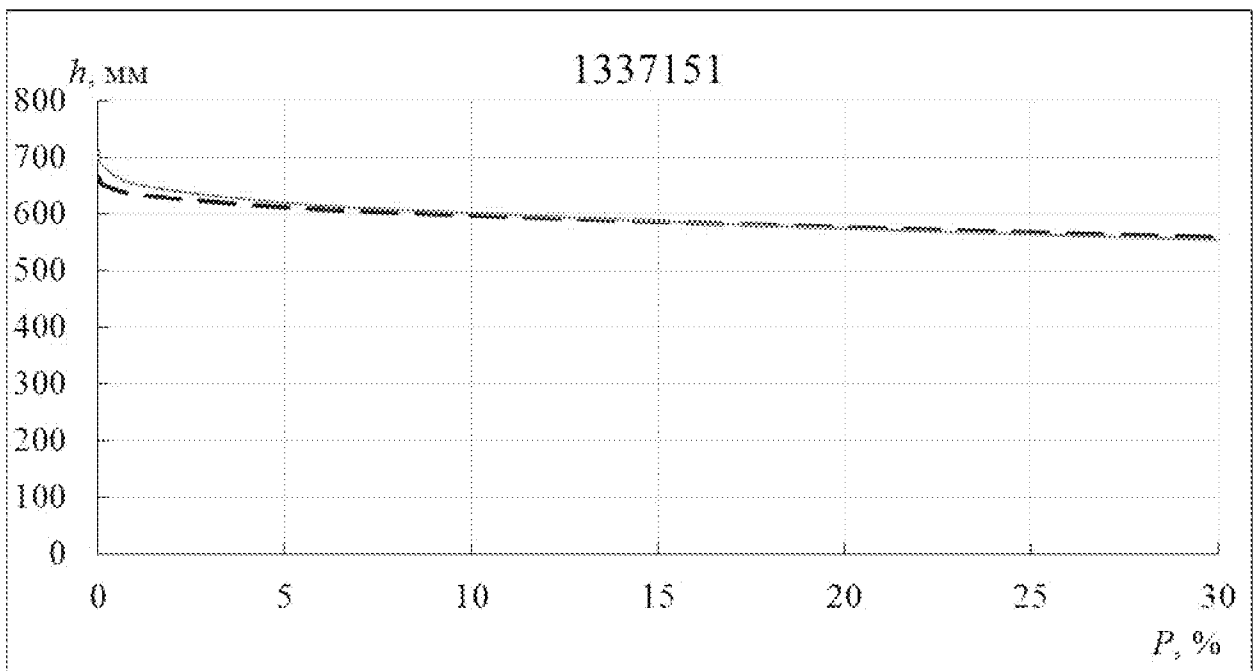
10)



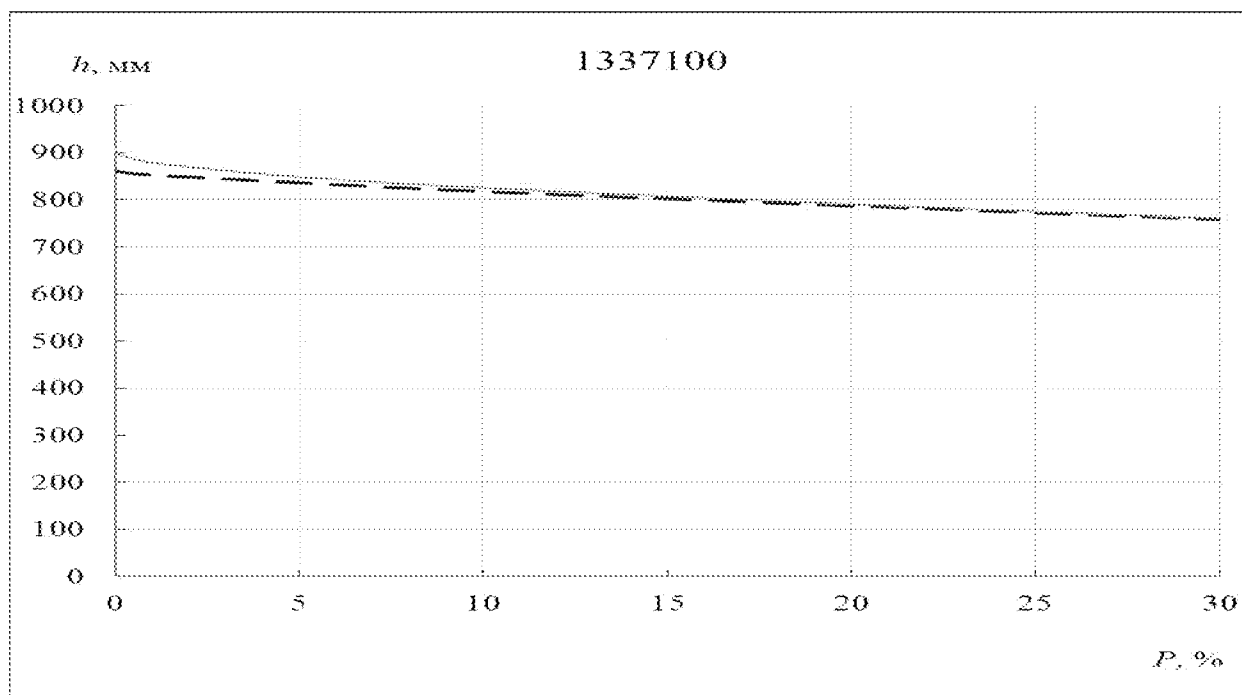
я)



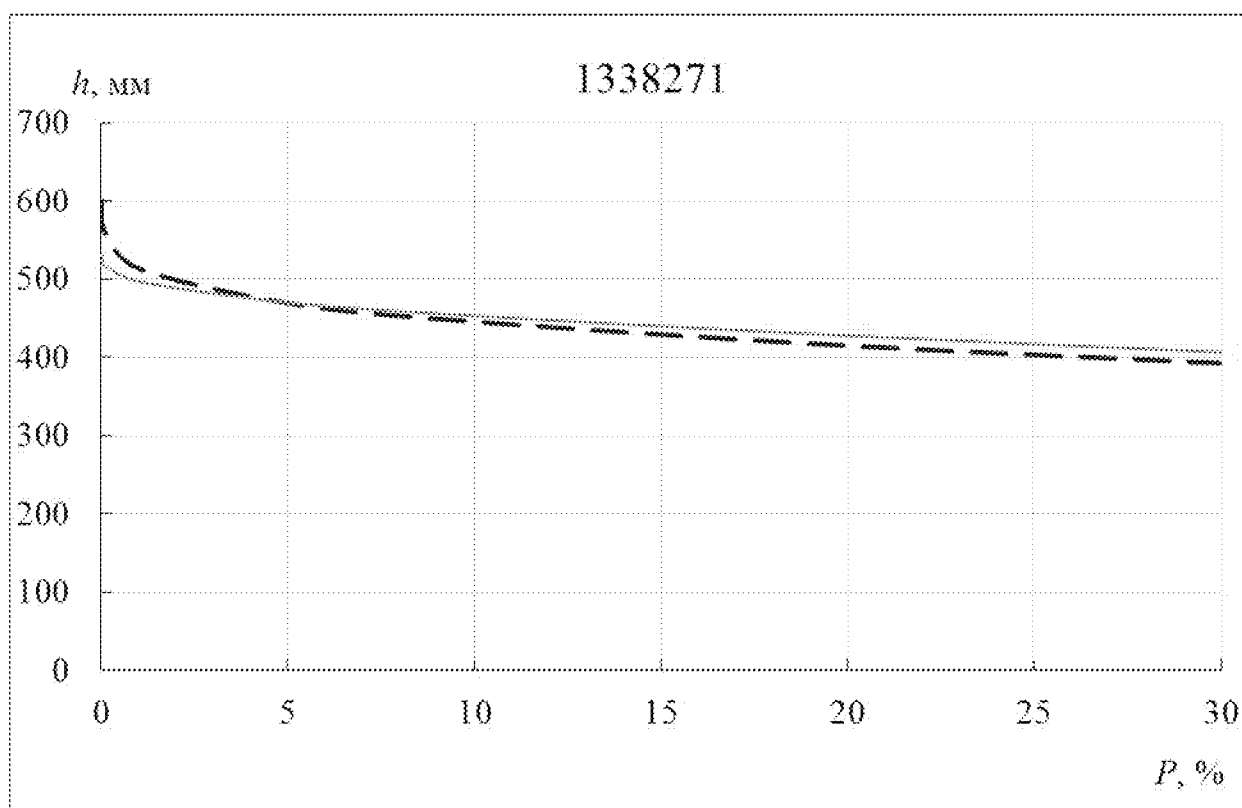
aa)



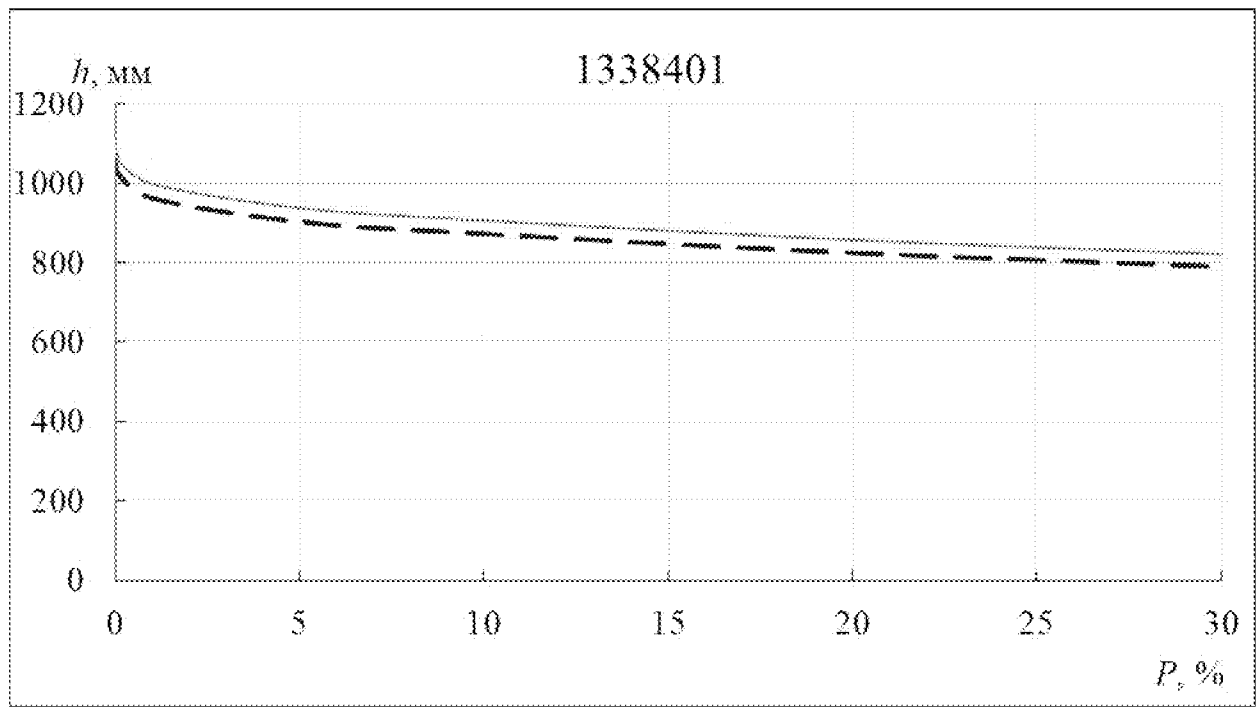
aб)



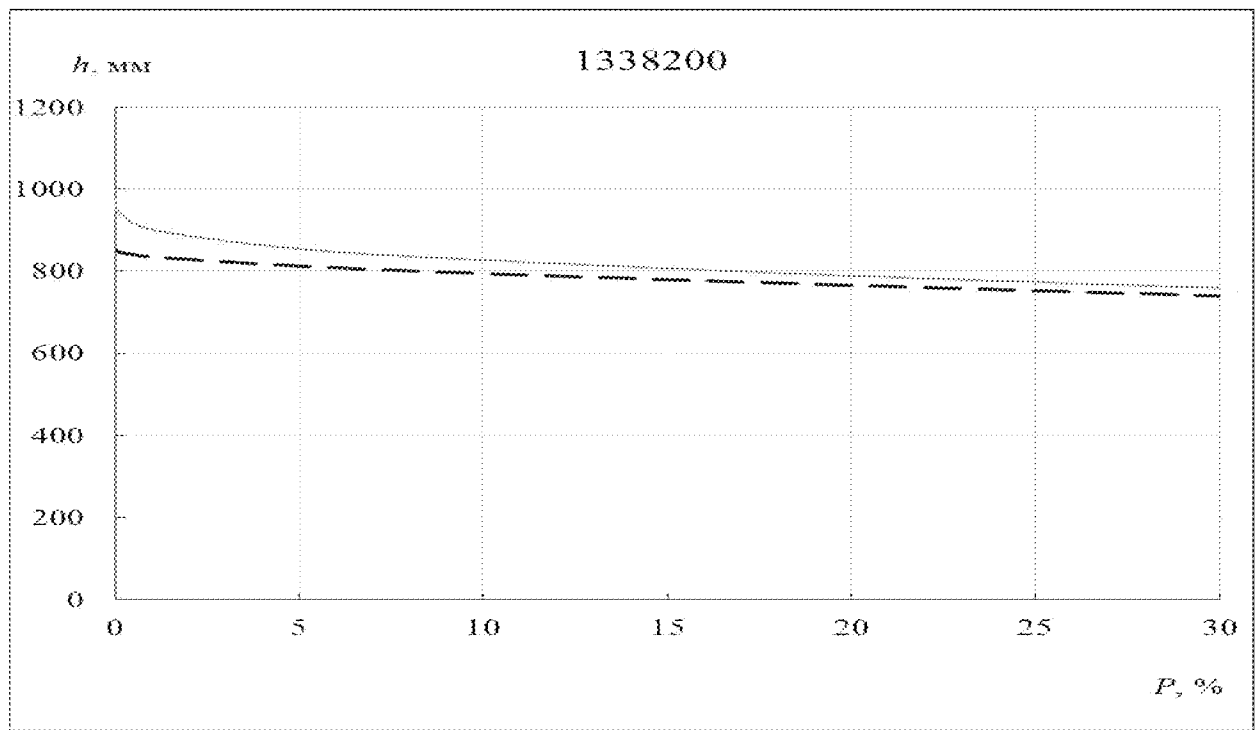
ae)



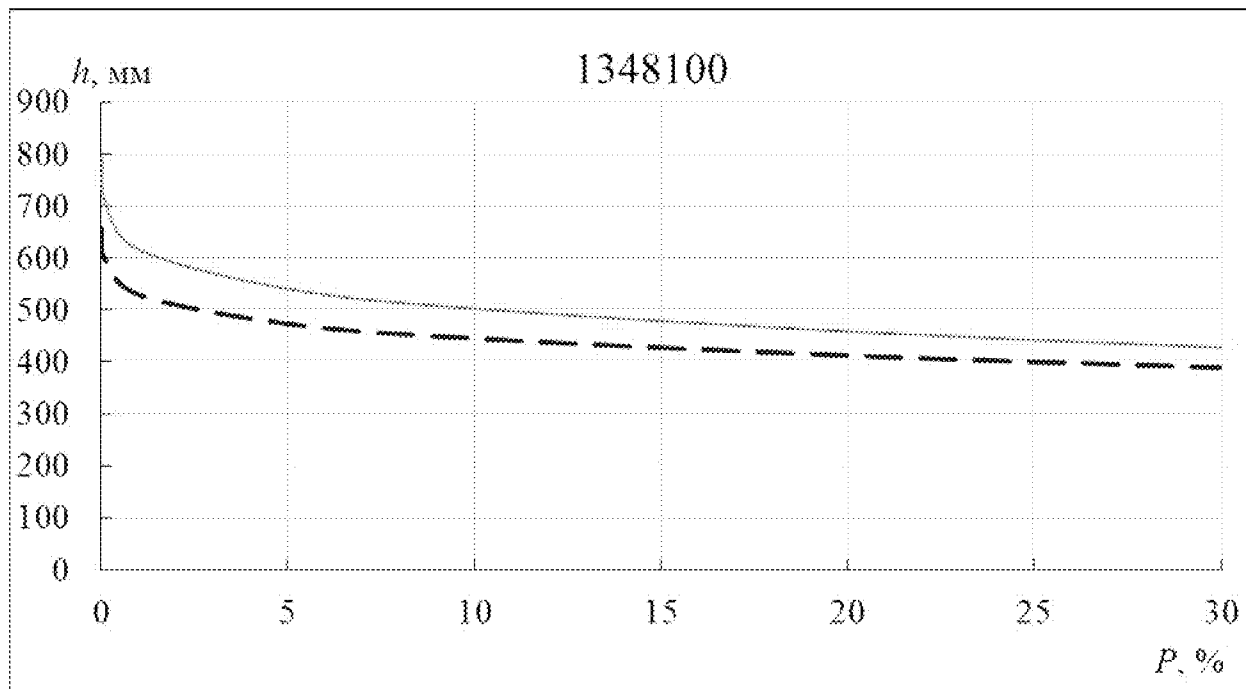
a2)



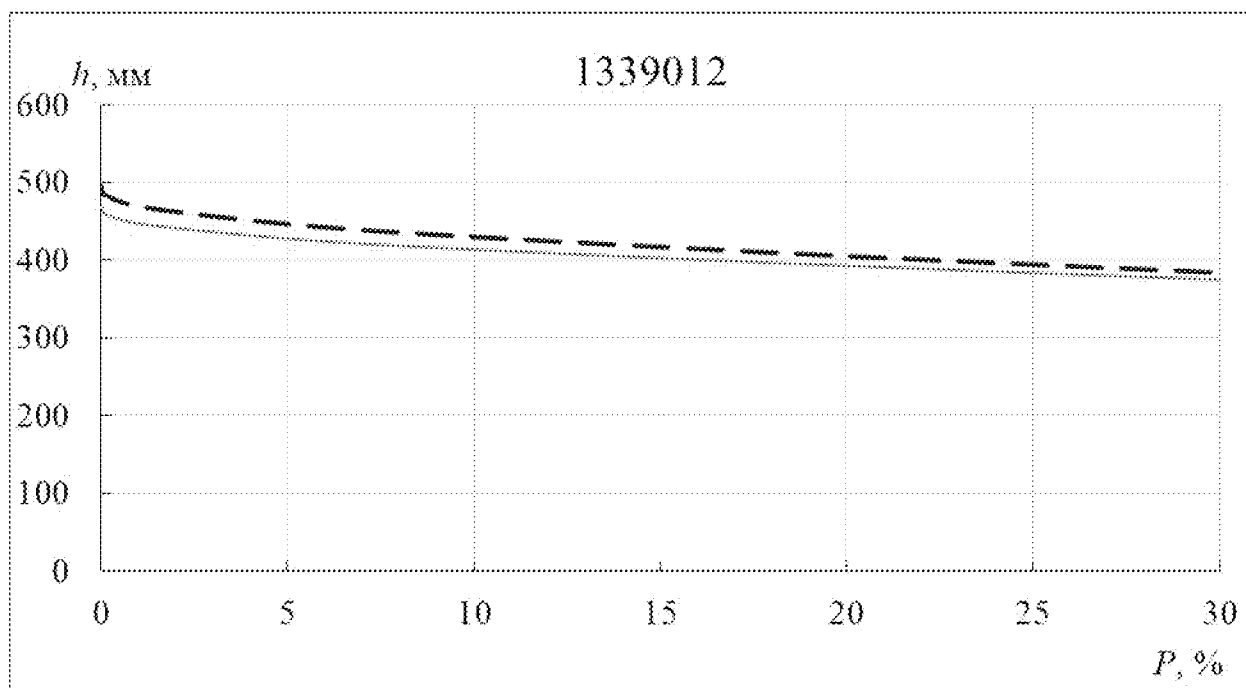
a3)



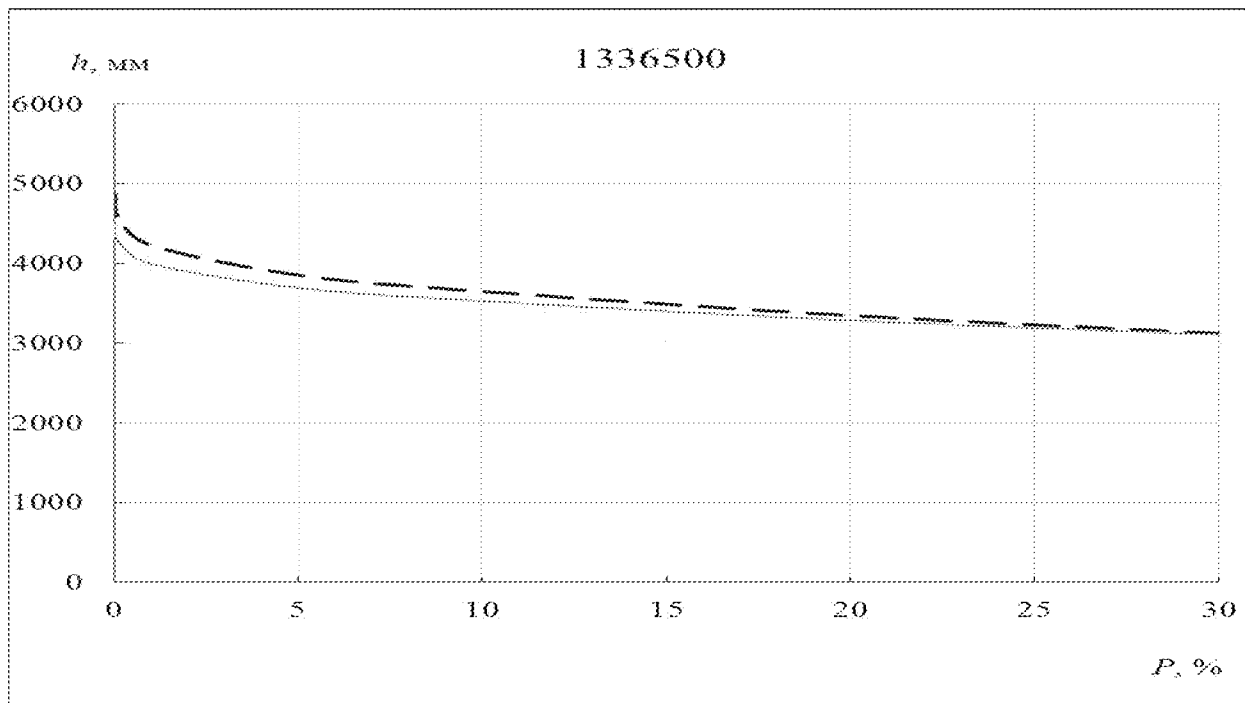
ae)



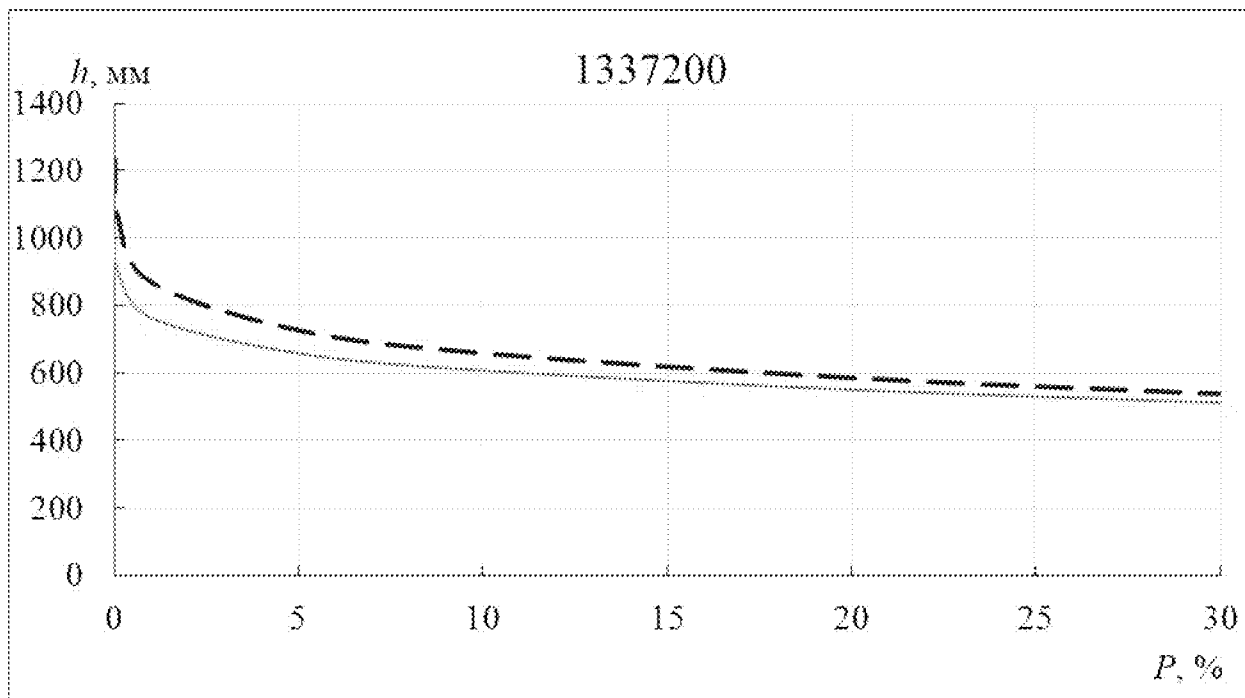
а)с)



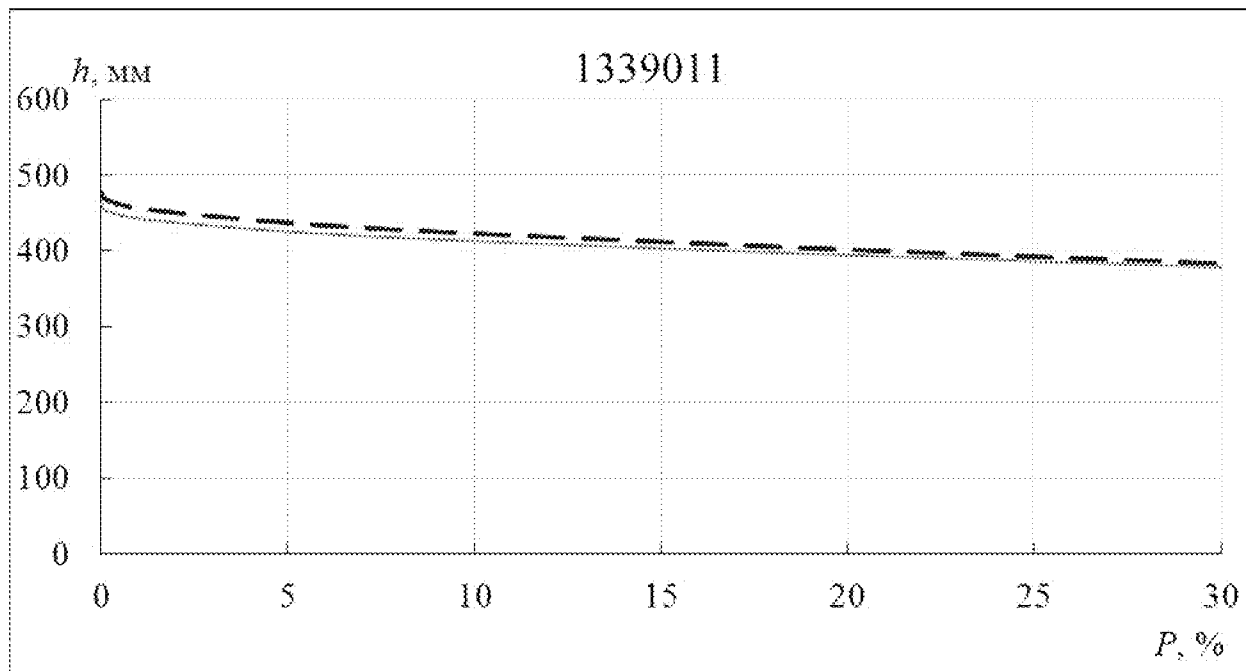
au)



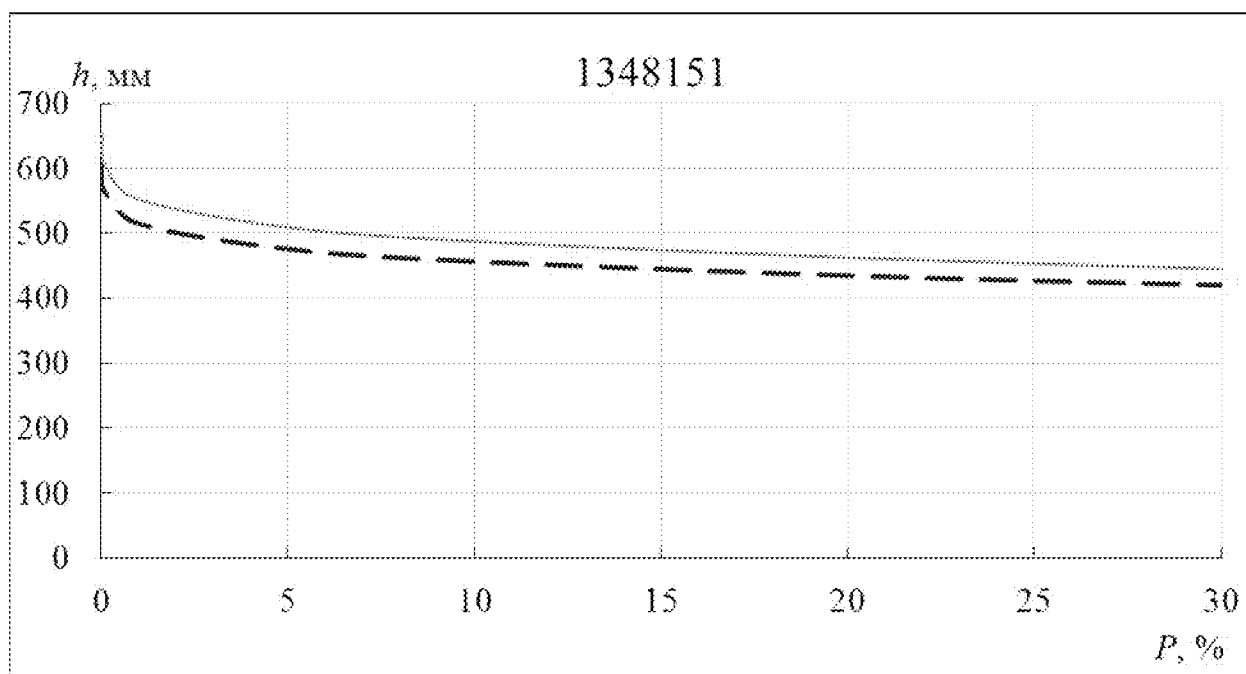
ak)



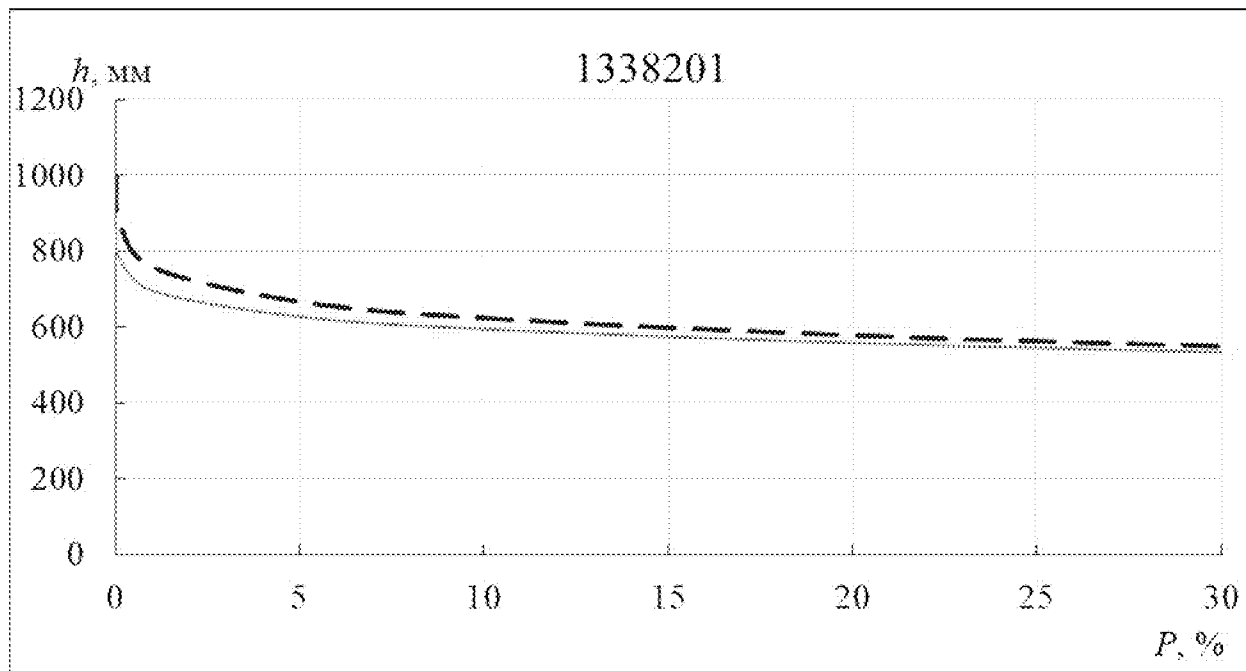
а)л)



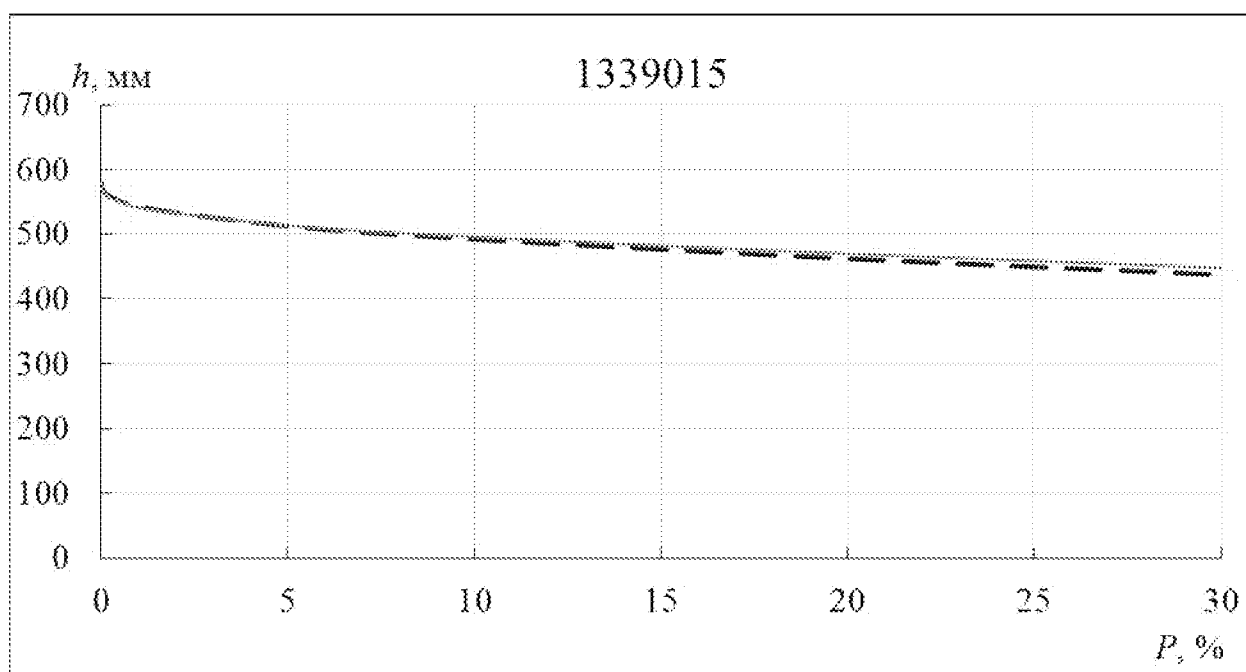
а)м)



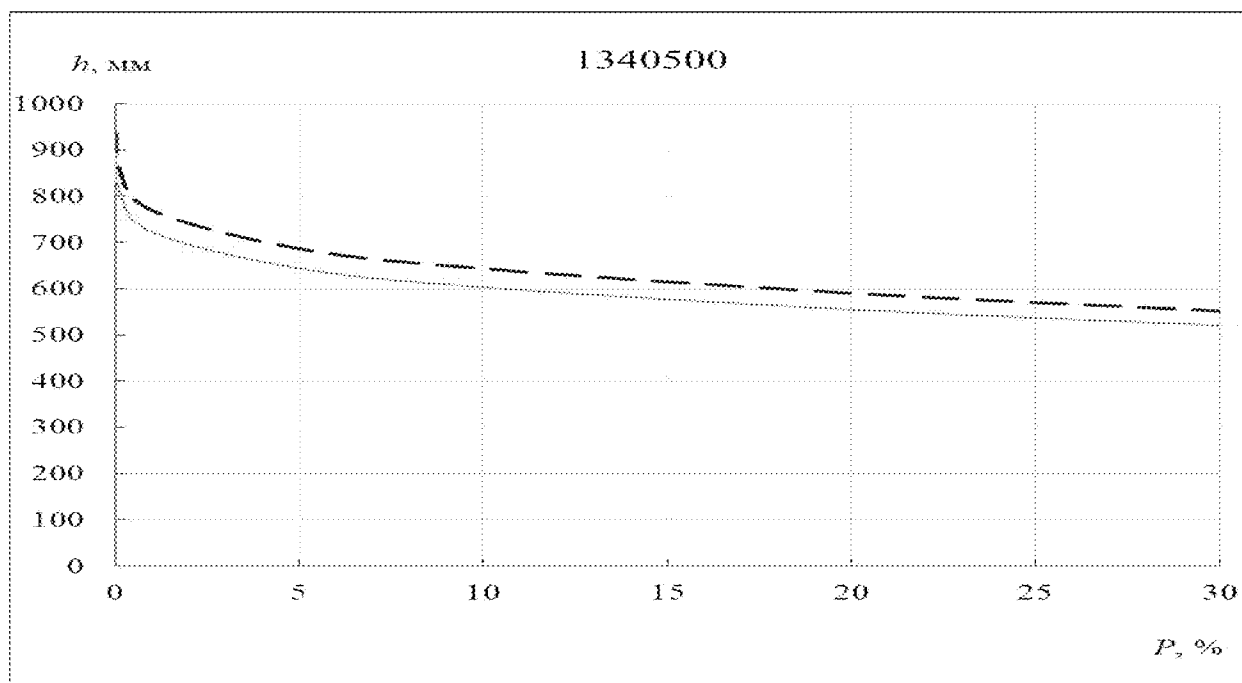
an)



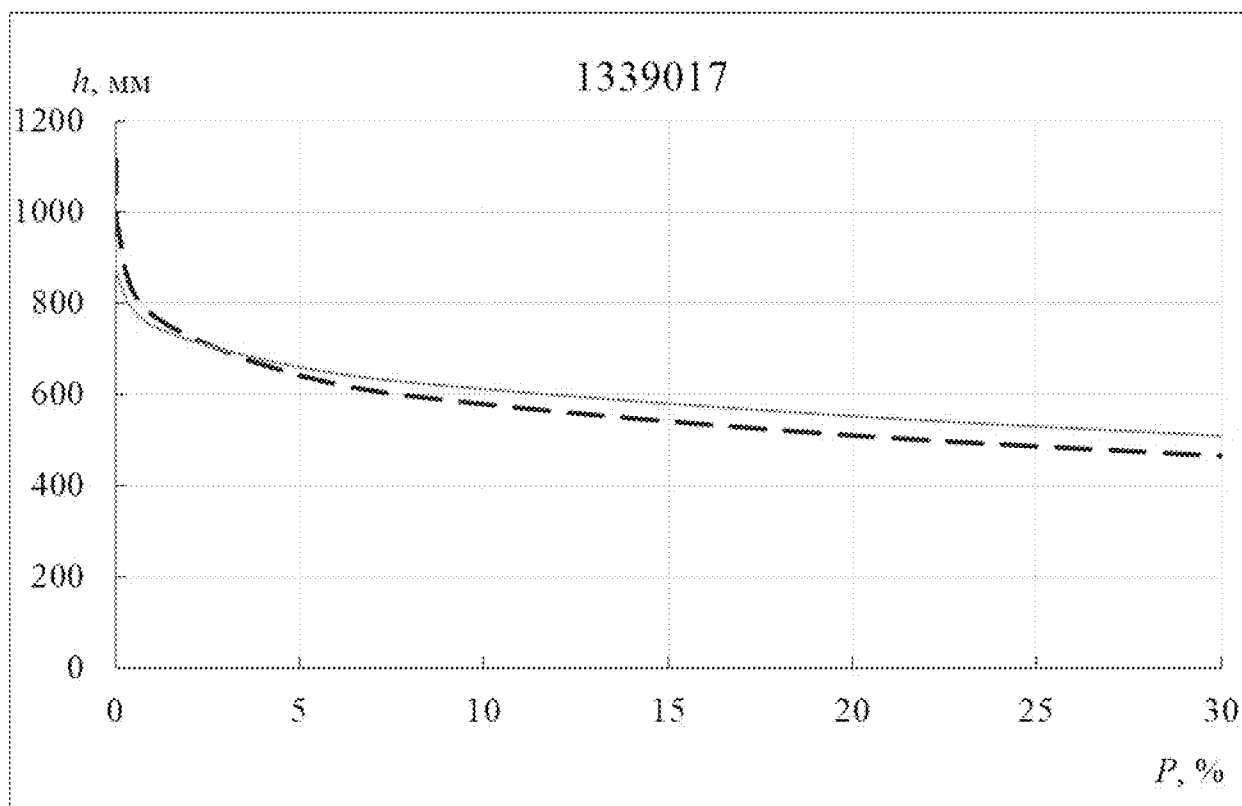
ao)



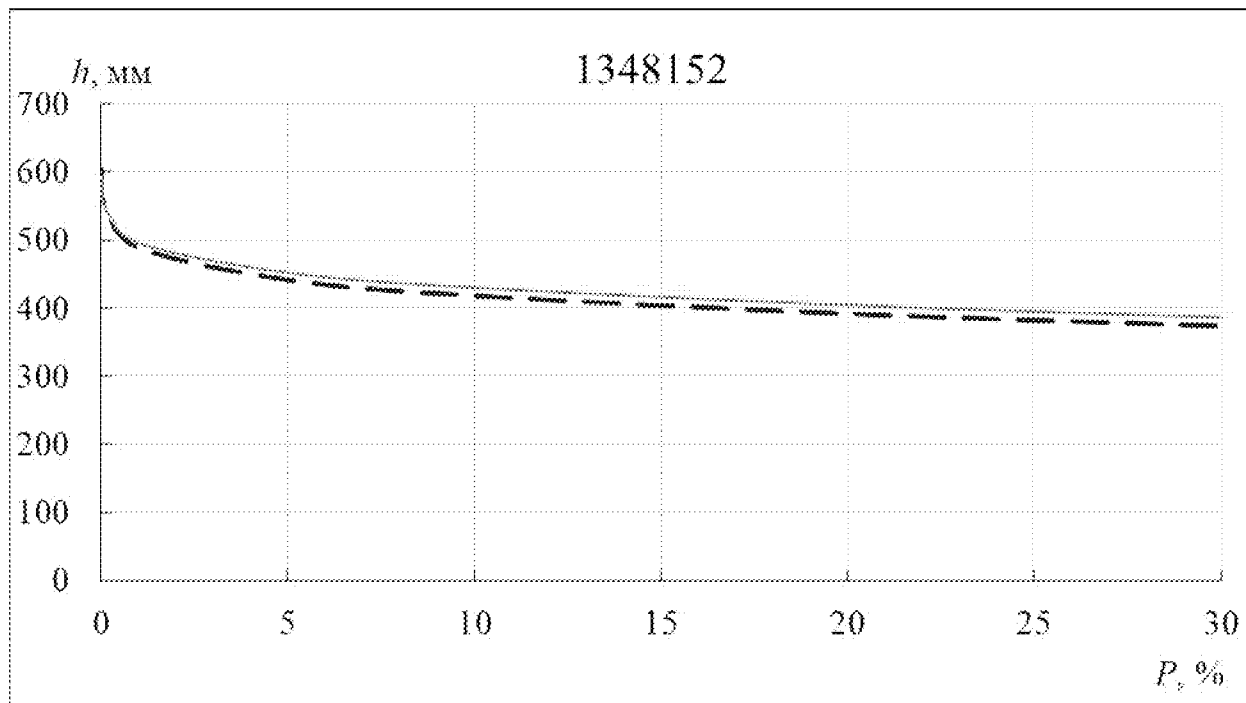
an)



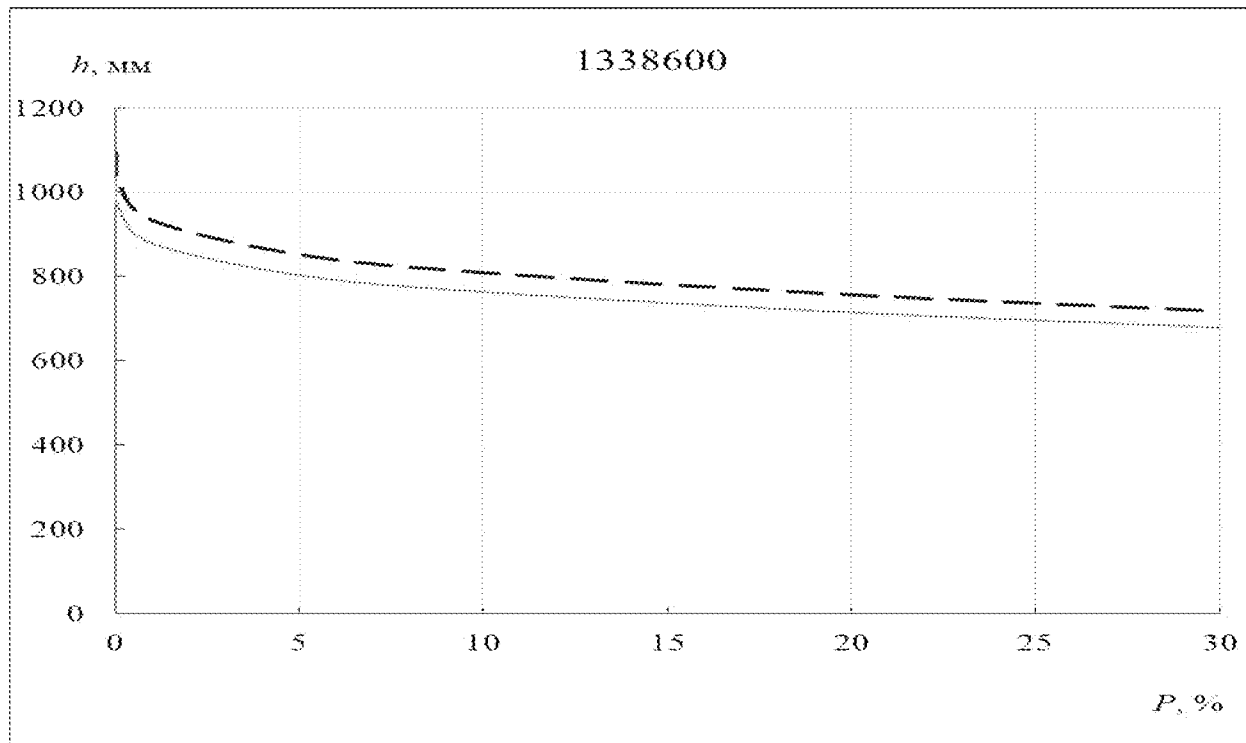
ap)



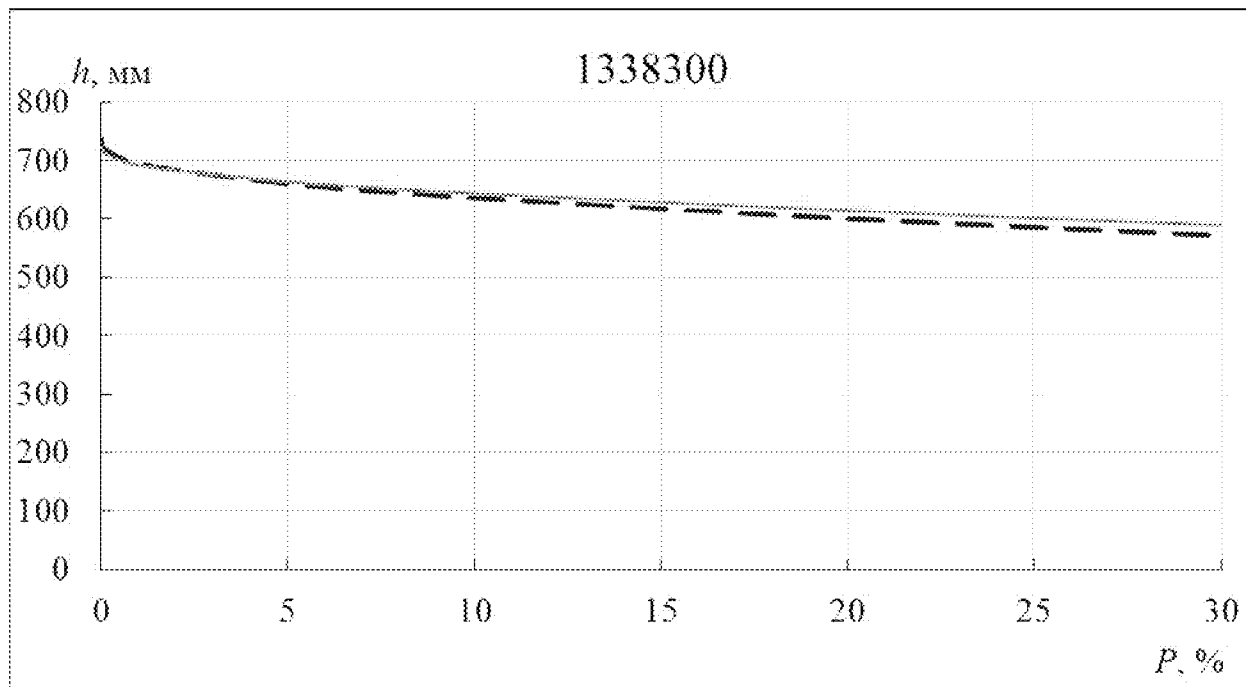
ac)



am)



ay)



af)

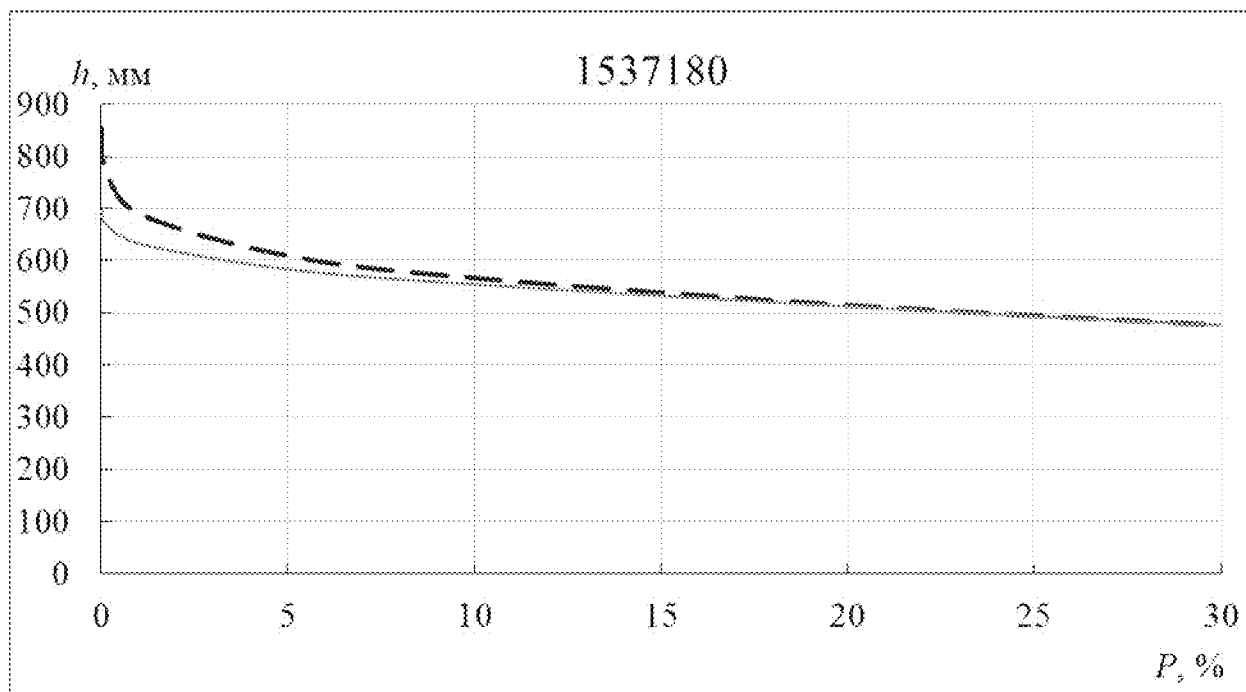
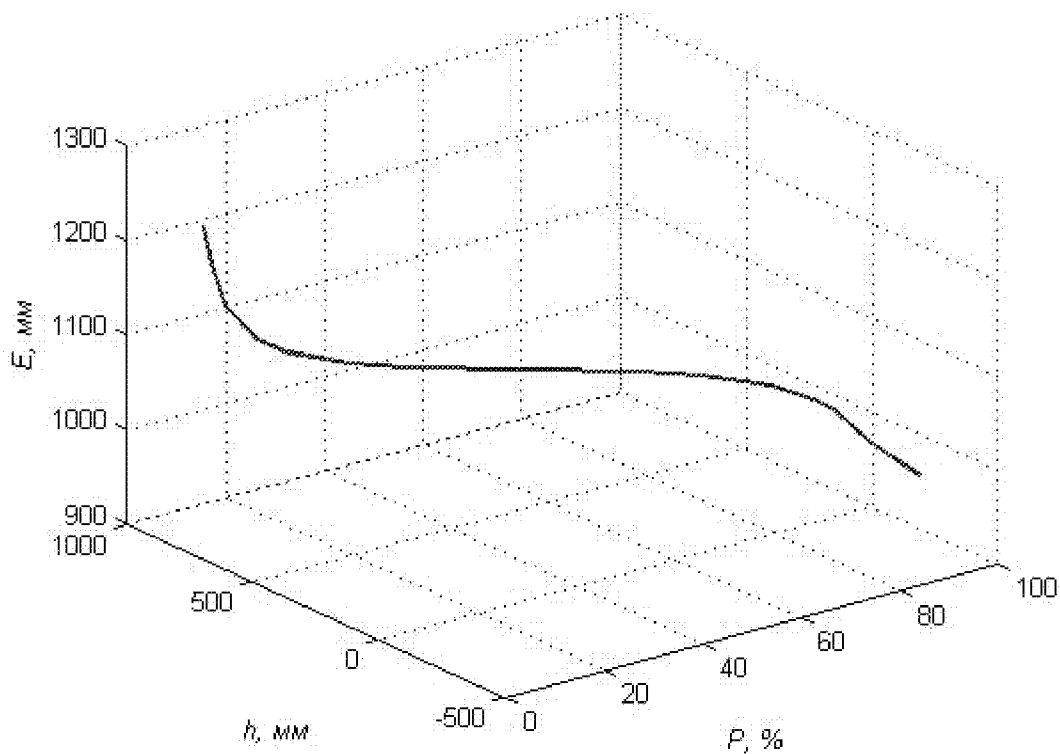


Рисунок Д.1 – Безусловные (—) и условные (---) кривые обеспеченностей.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Одномерные многообразия

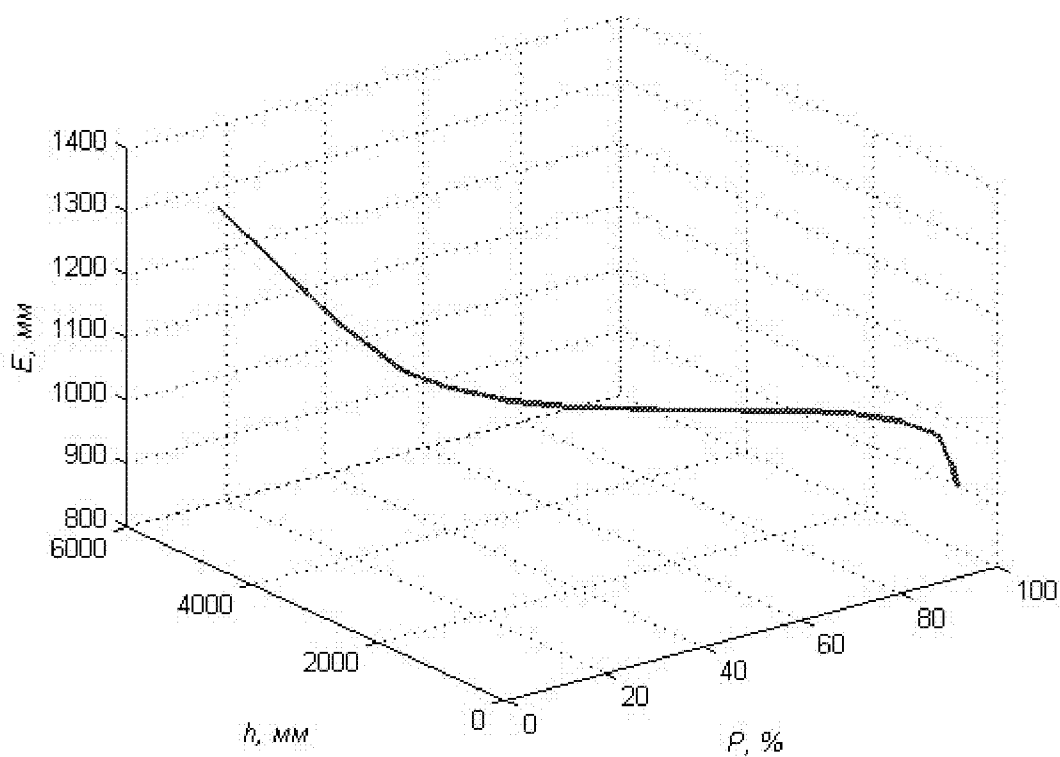
a)

1634550



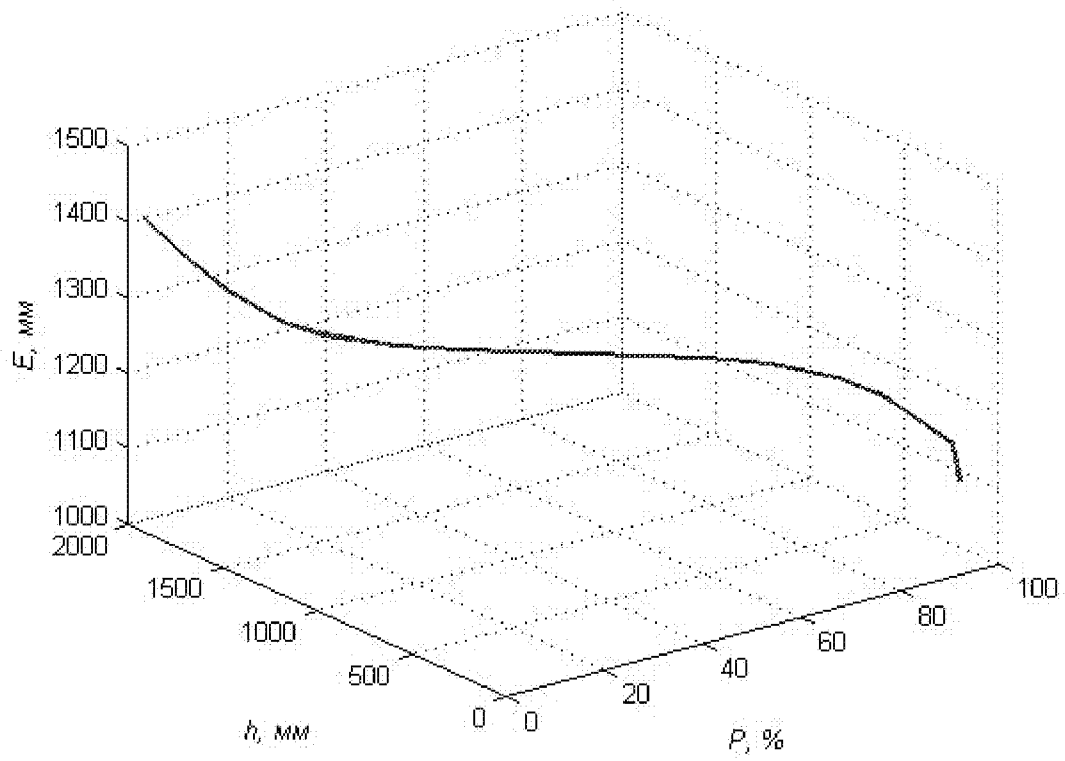
b)

1634100



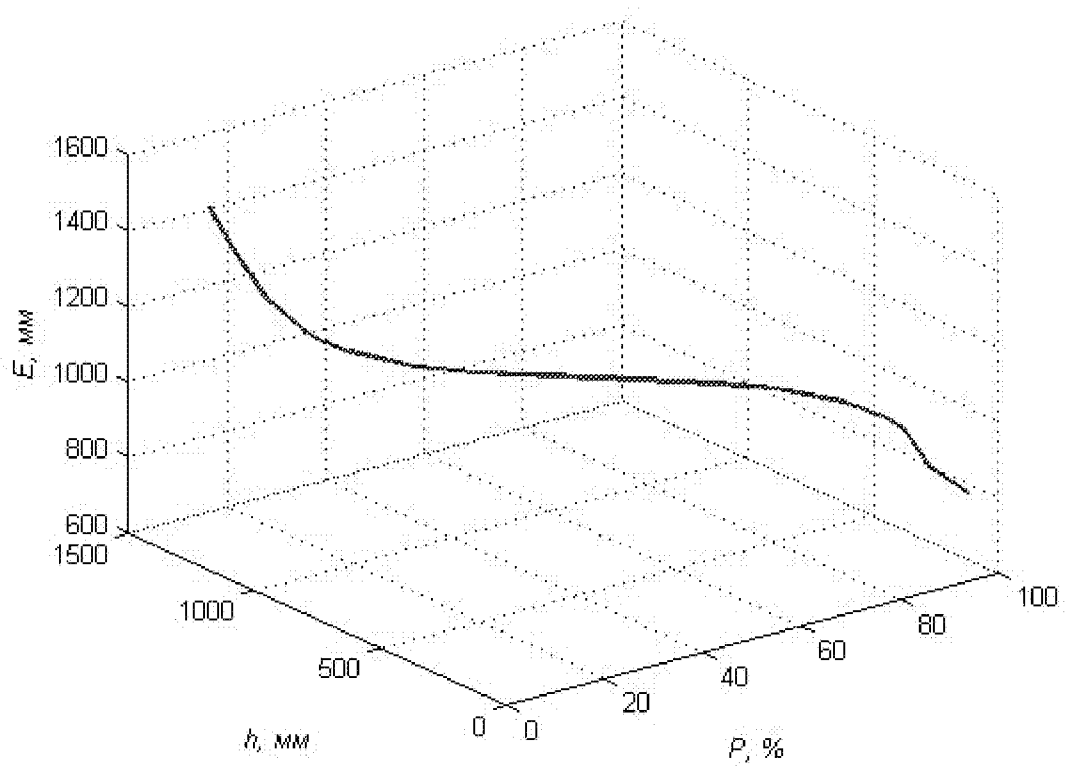
e)

1634500



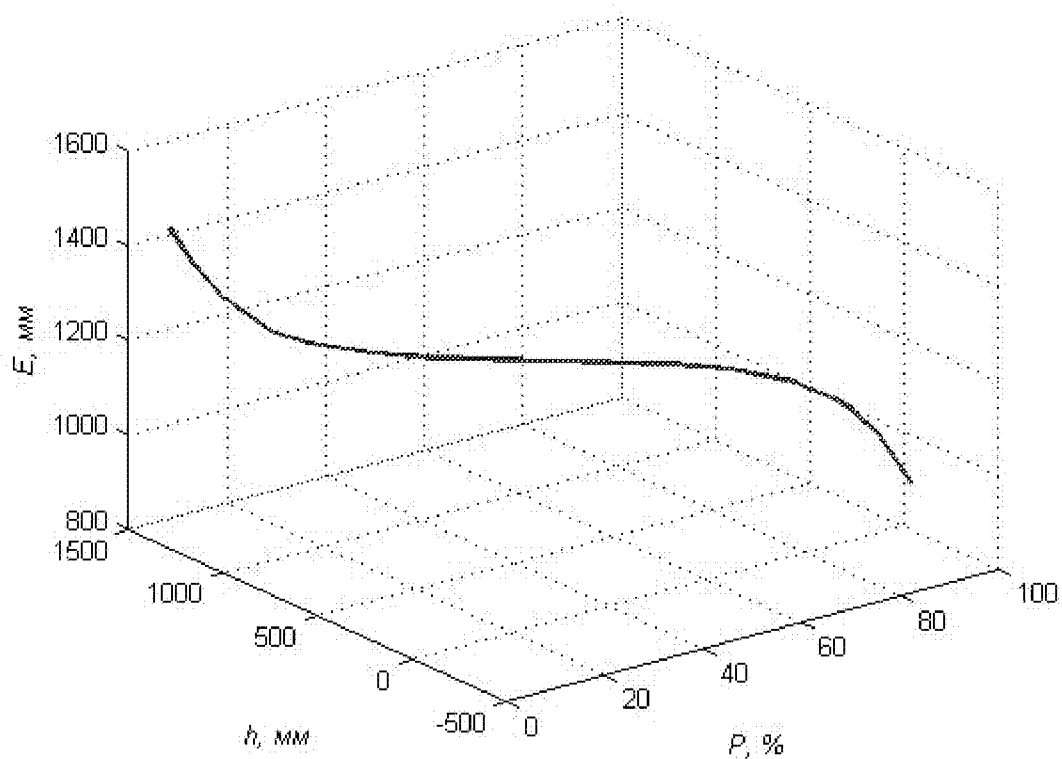
z)

1634420



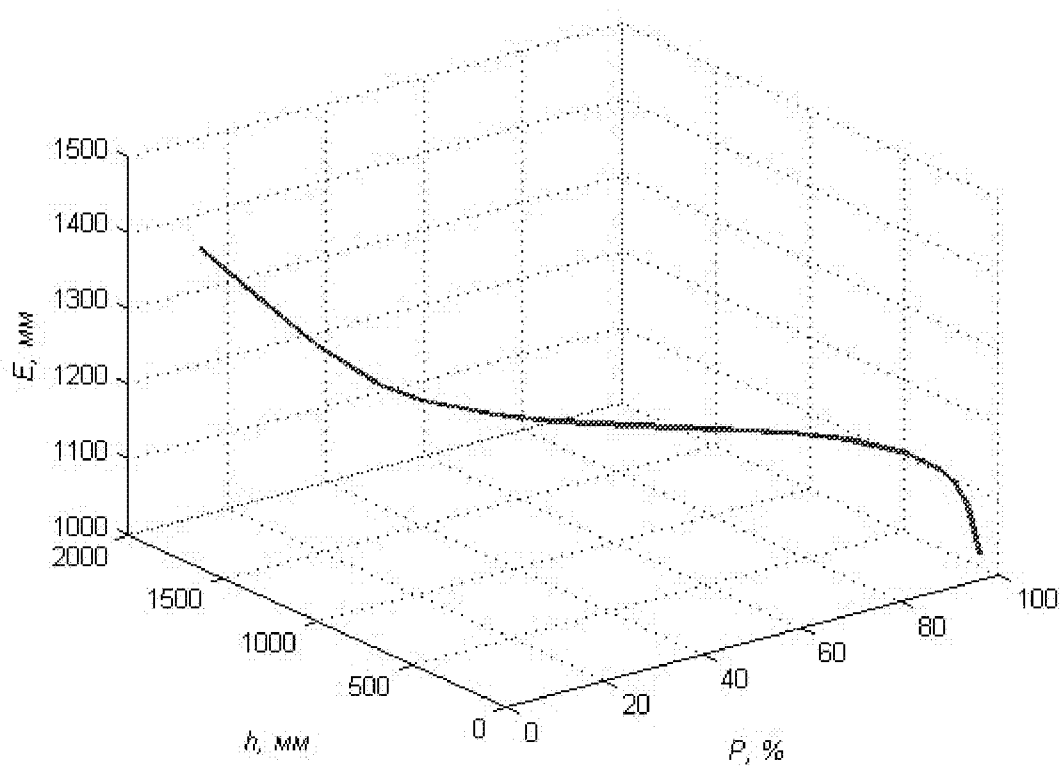
d)

1634400



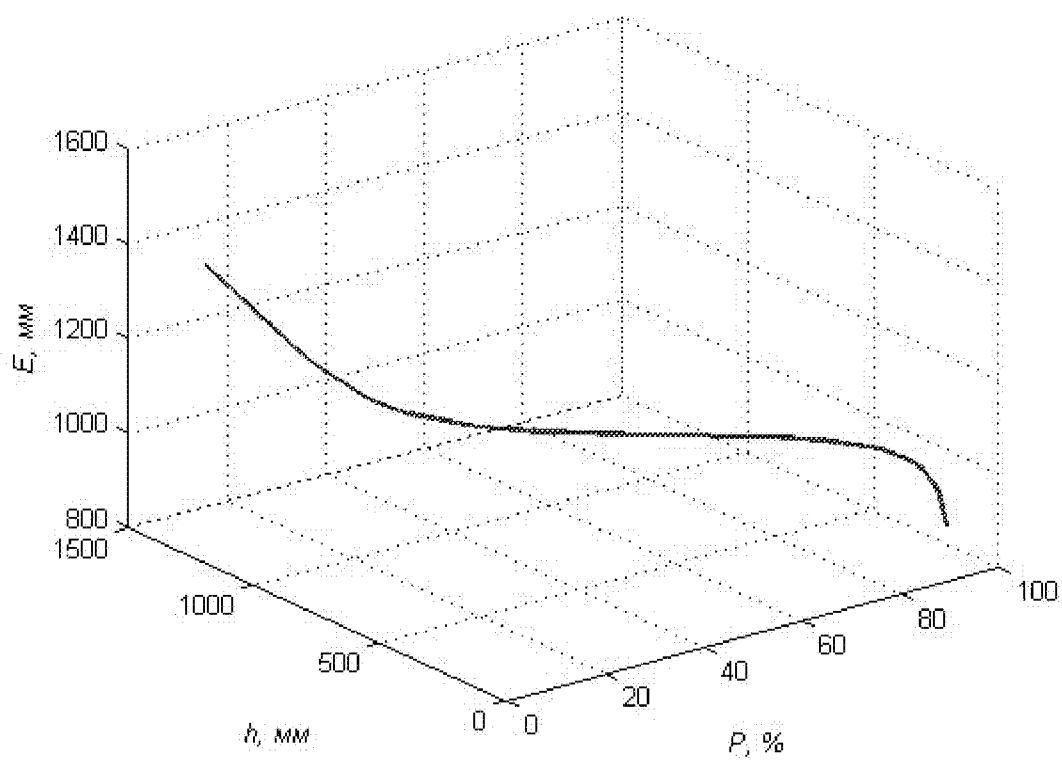
e)

1634800



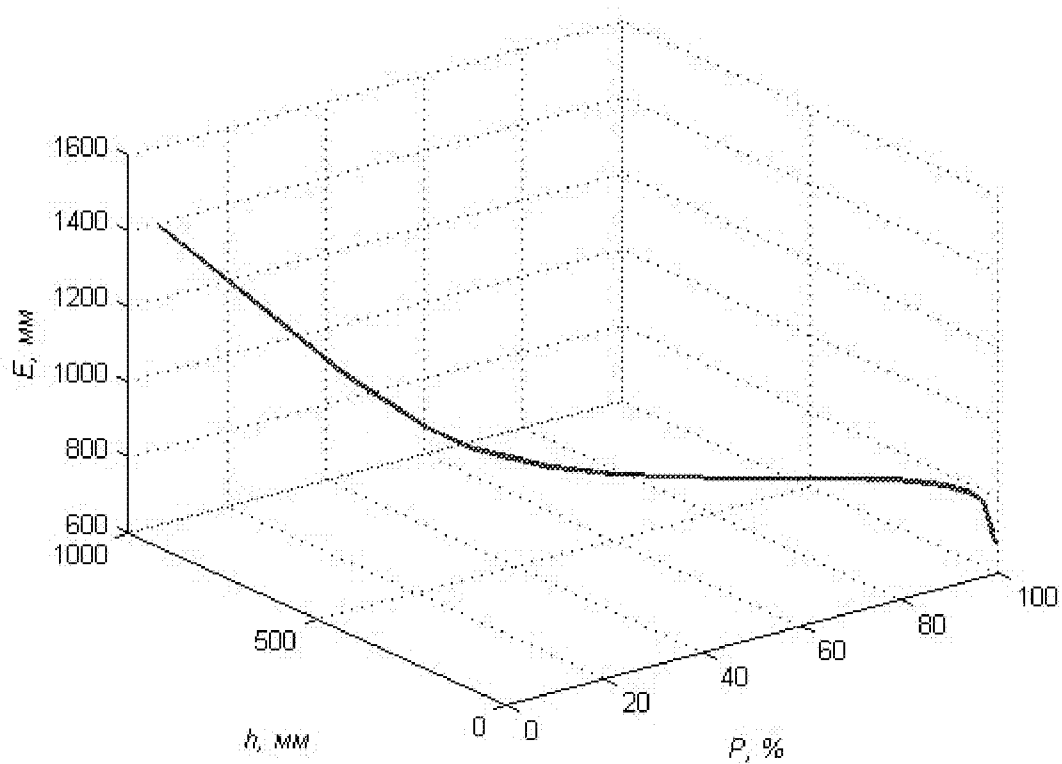
oic)

1734480



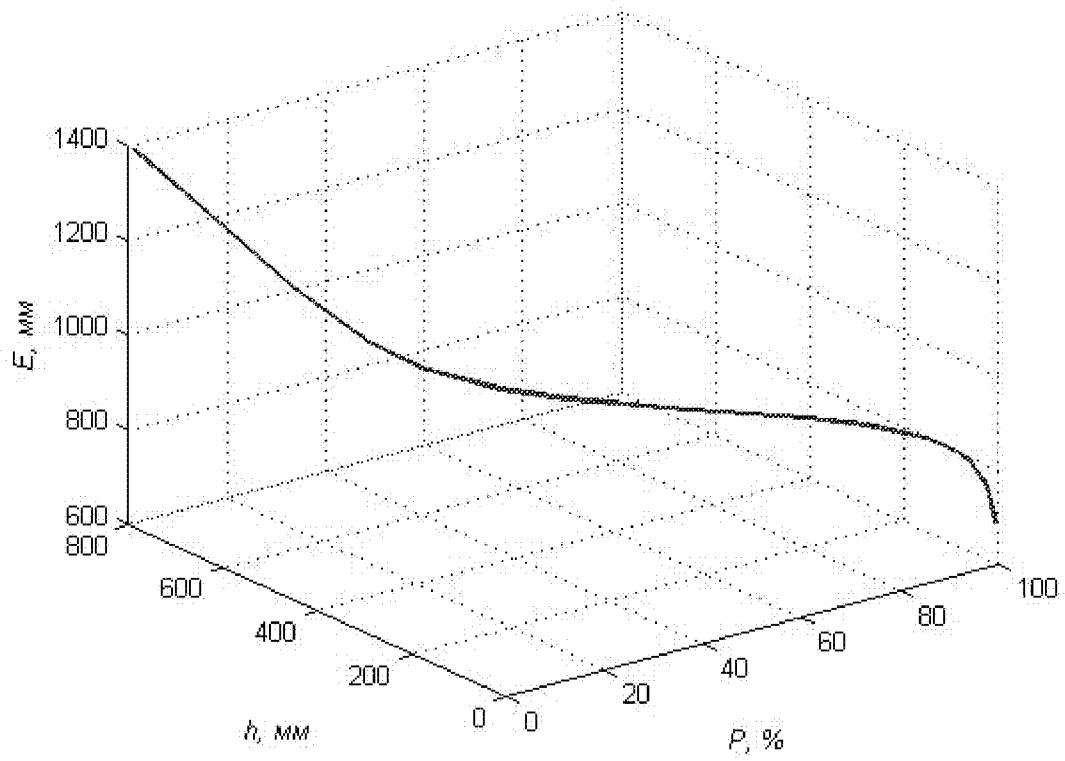
u)

1734400



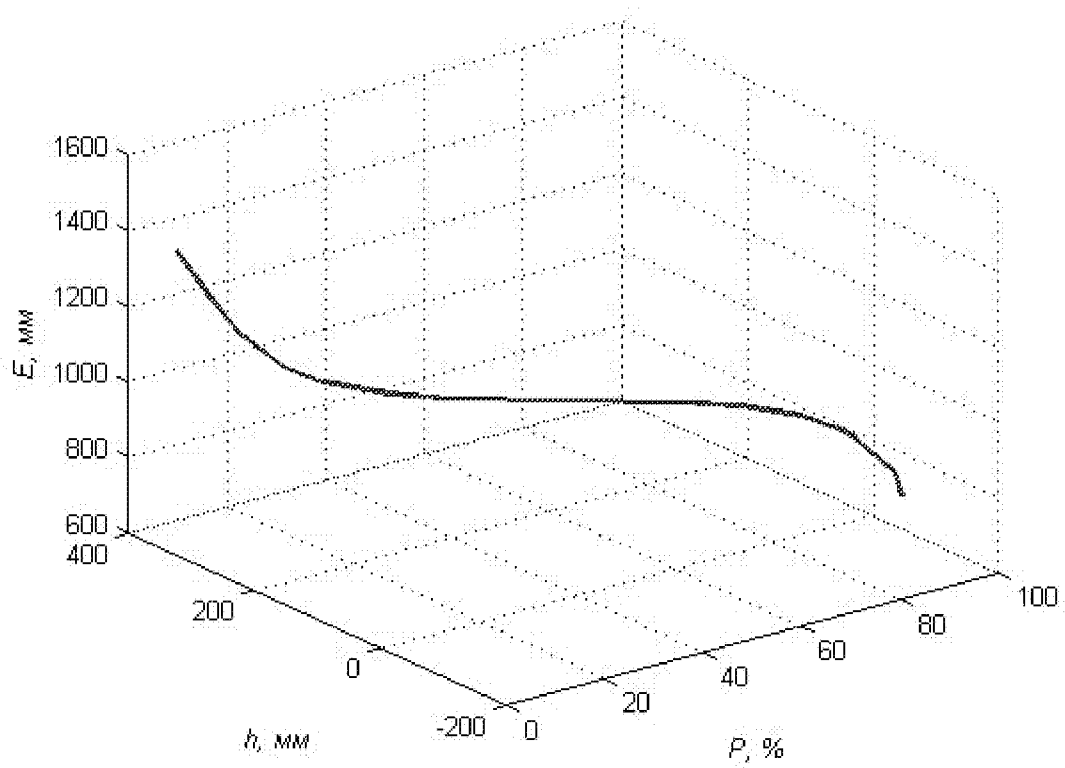
κ)

1734410



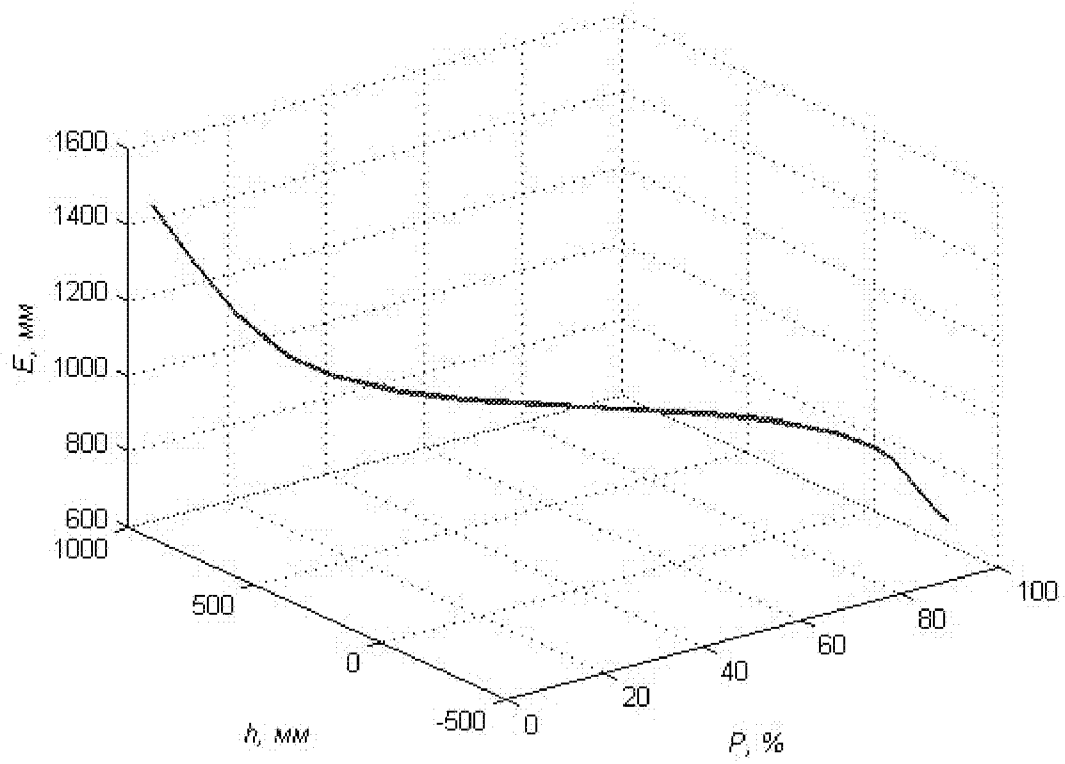
λ)

1732100



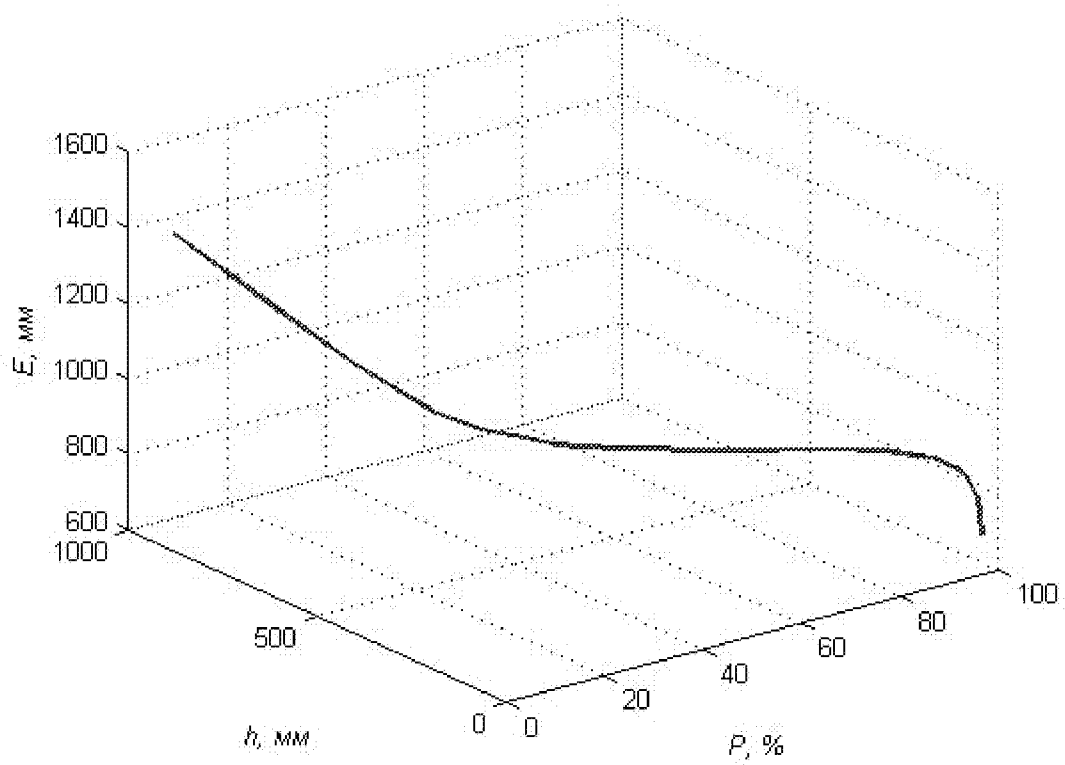
m)

1731400



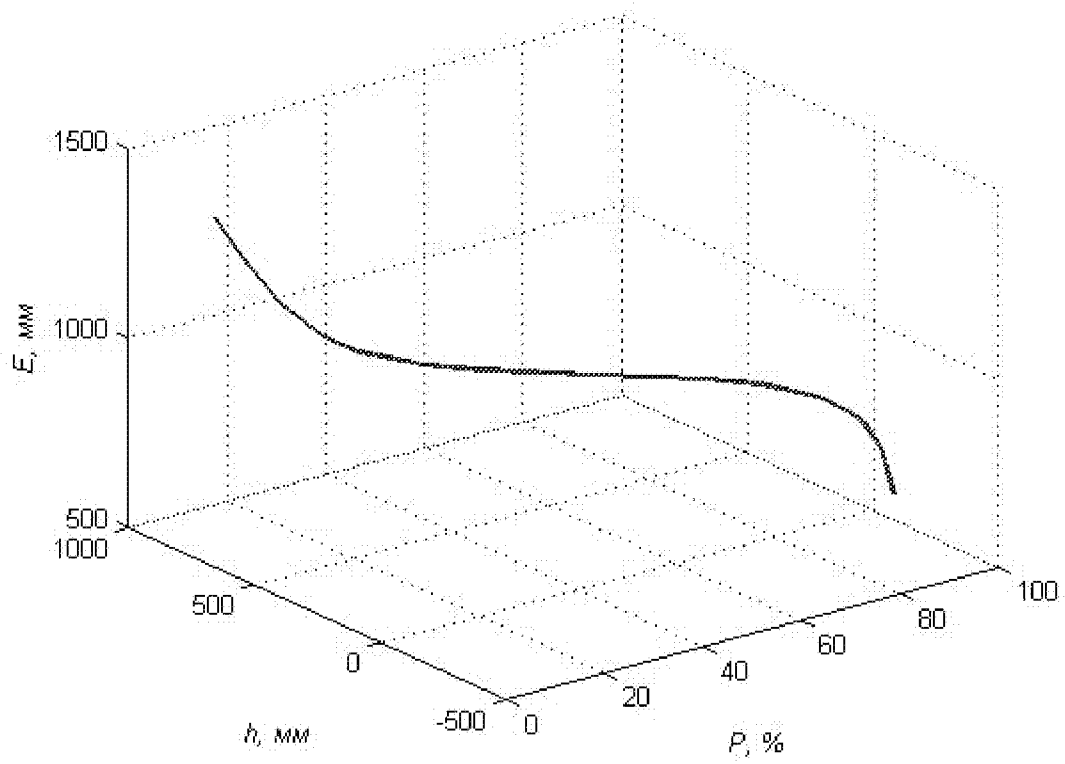
n)

1733300



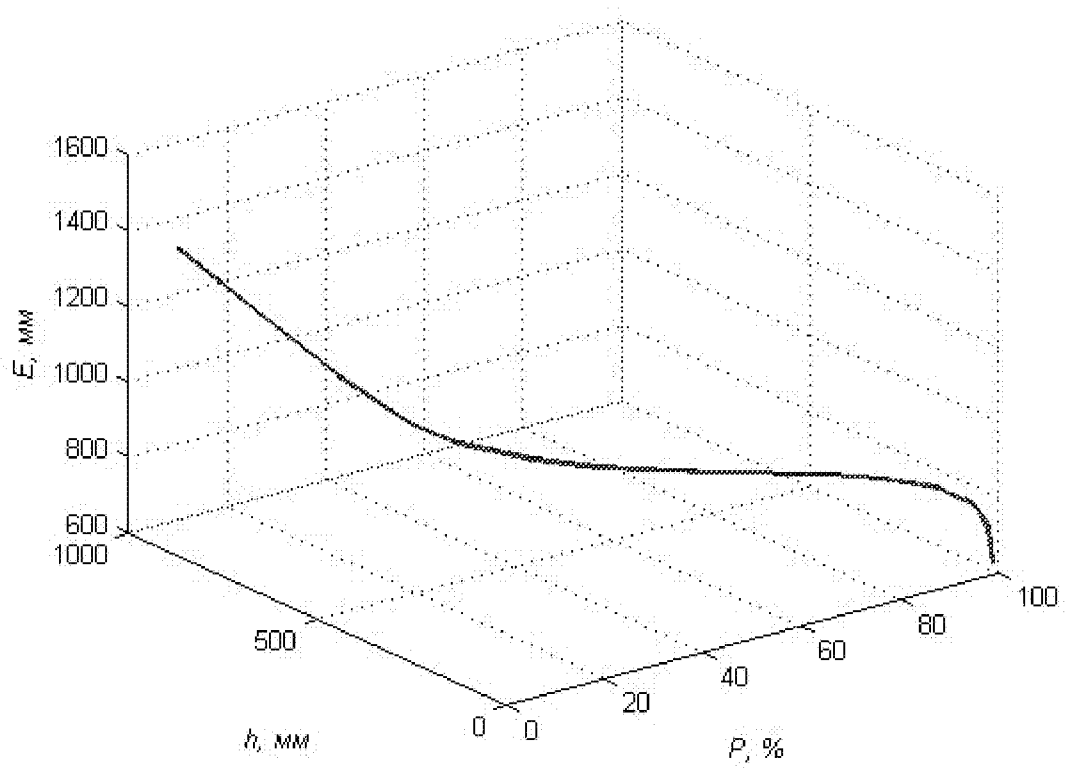
o)

1733600



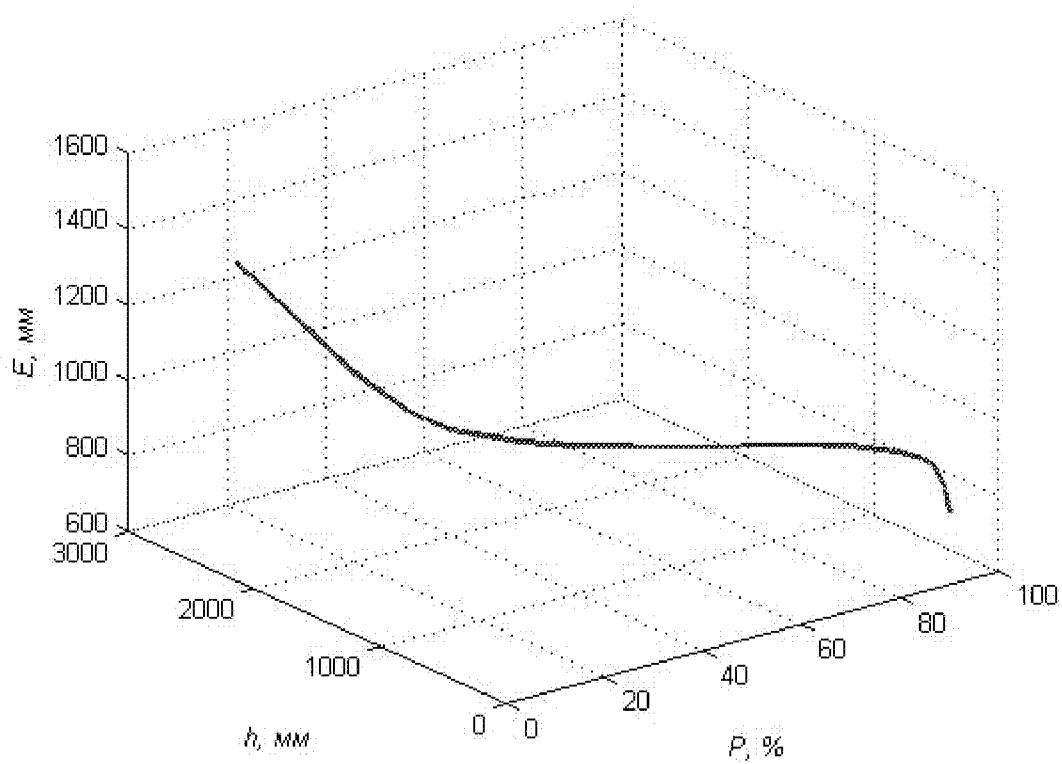
n)

1434780



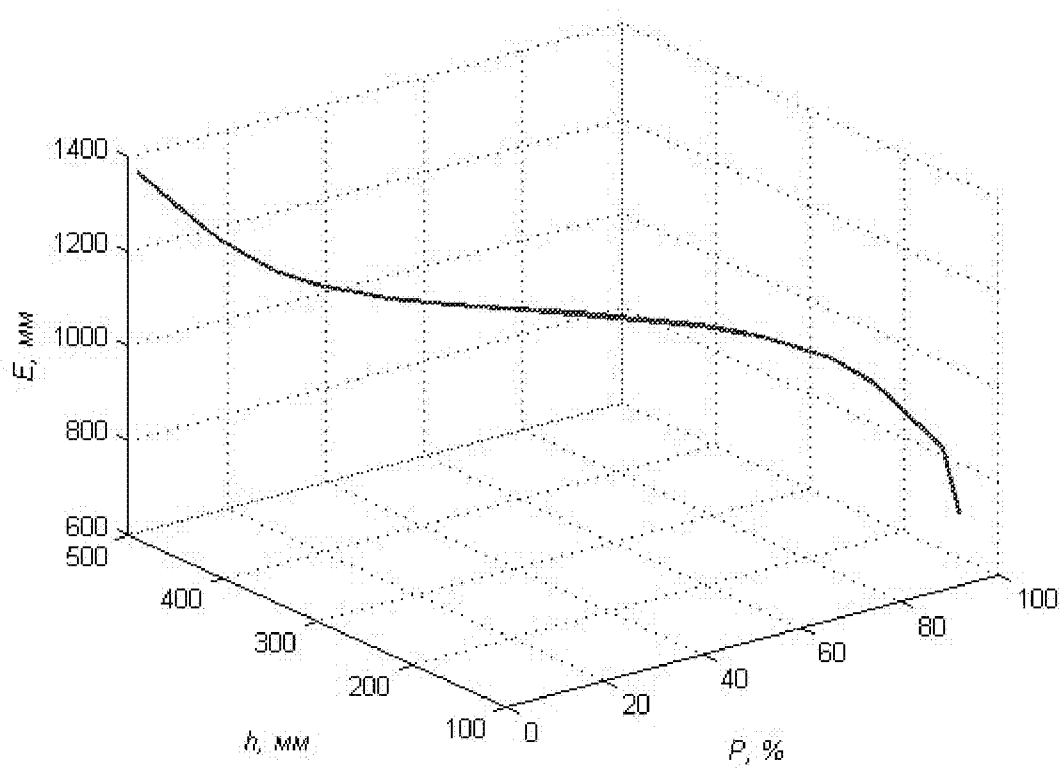
p)

1530100



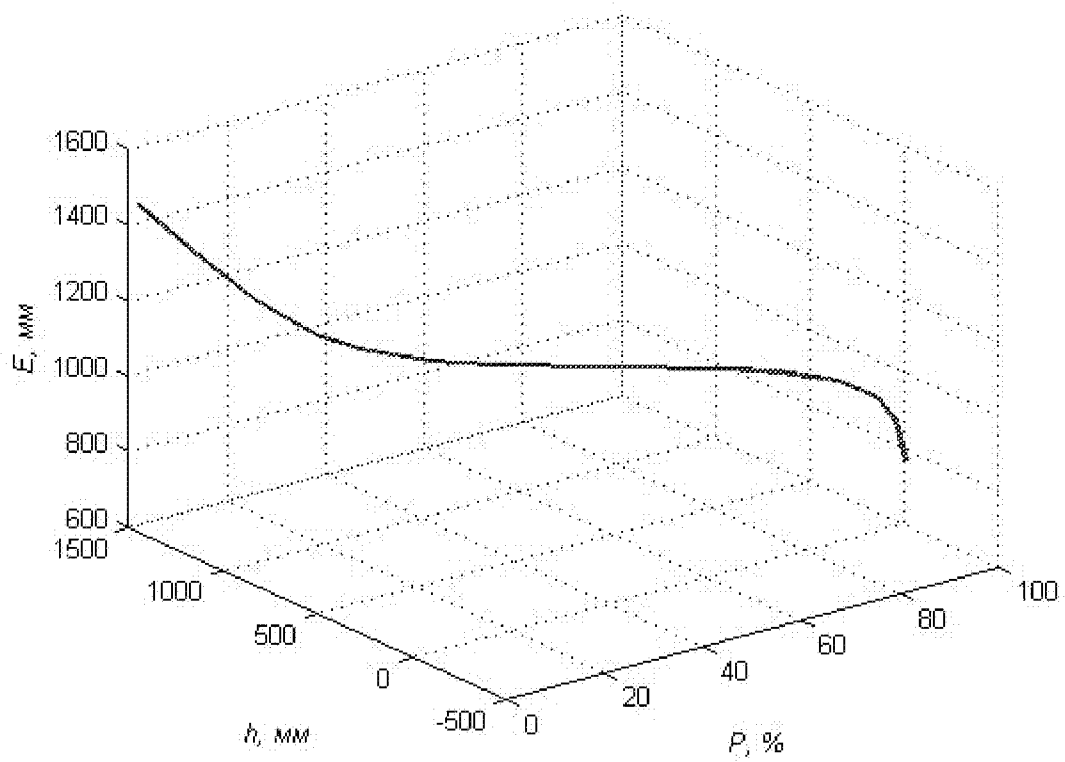
c)

1134040



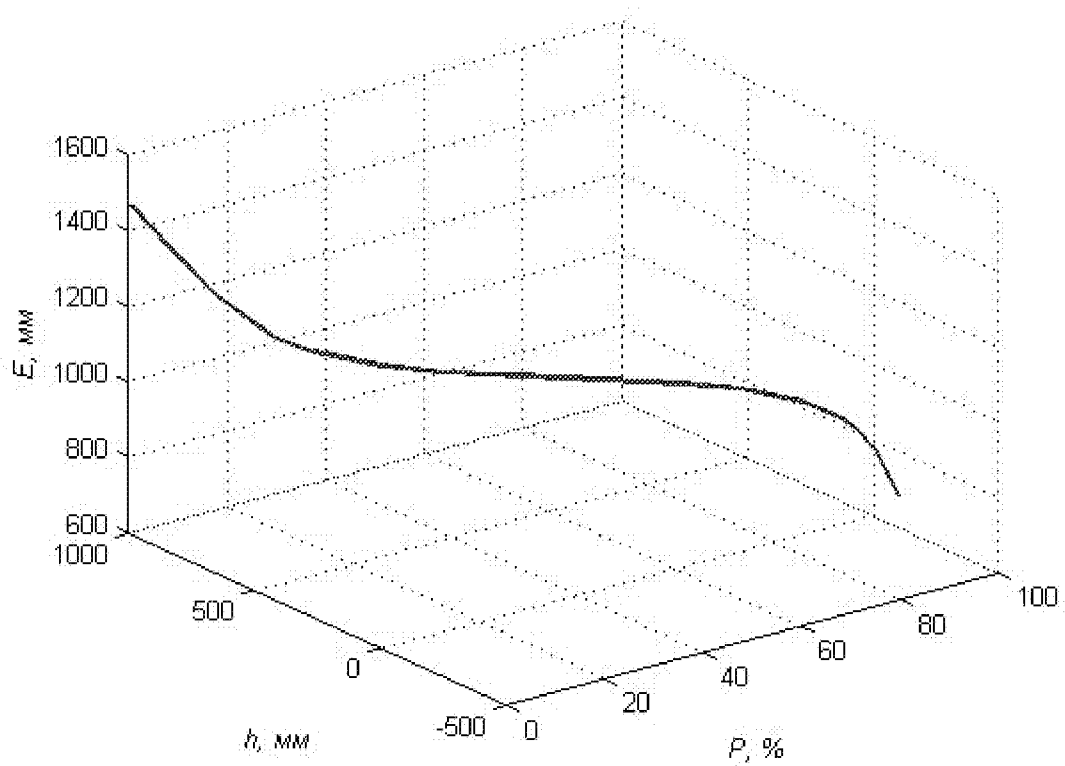
m)

1112200



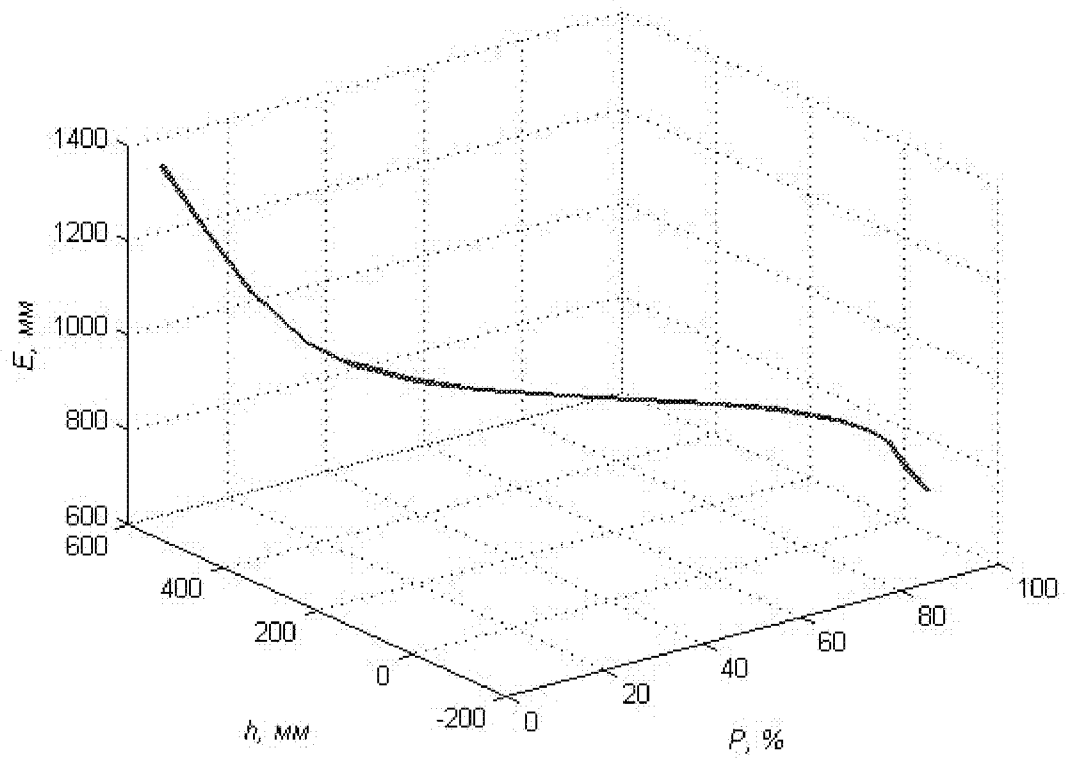
y)

1928745



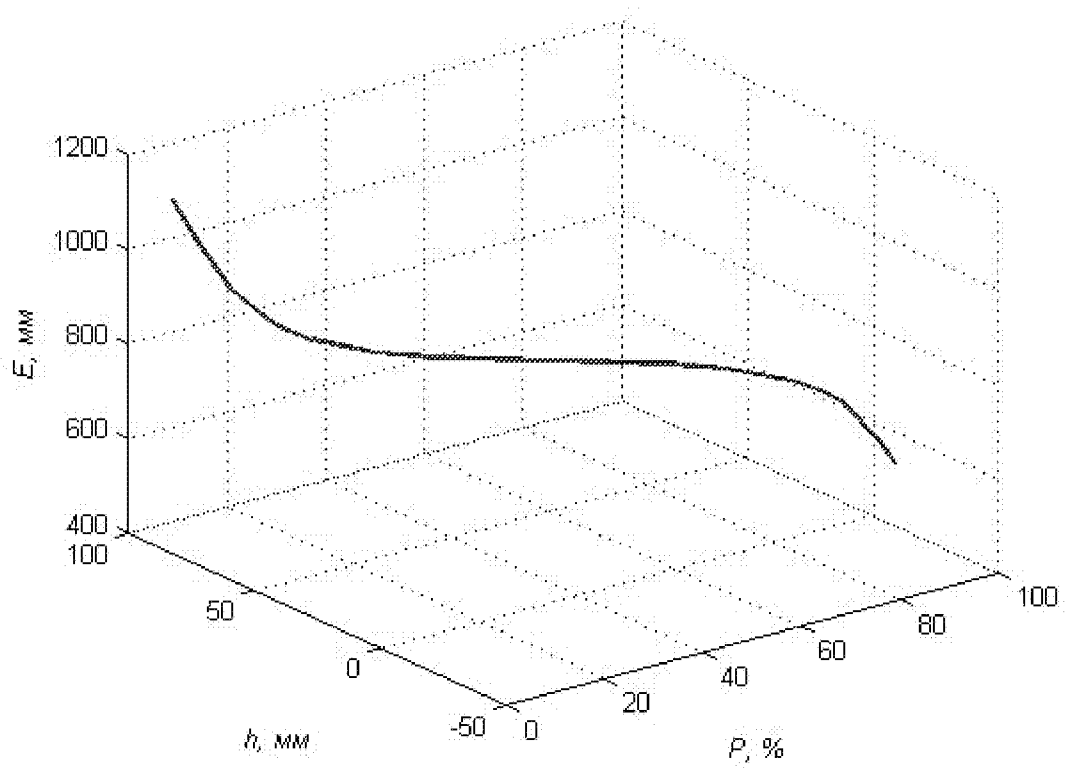
φ)

1931370



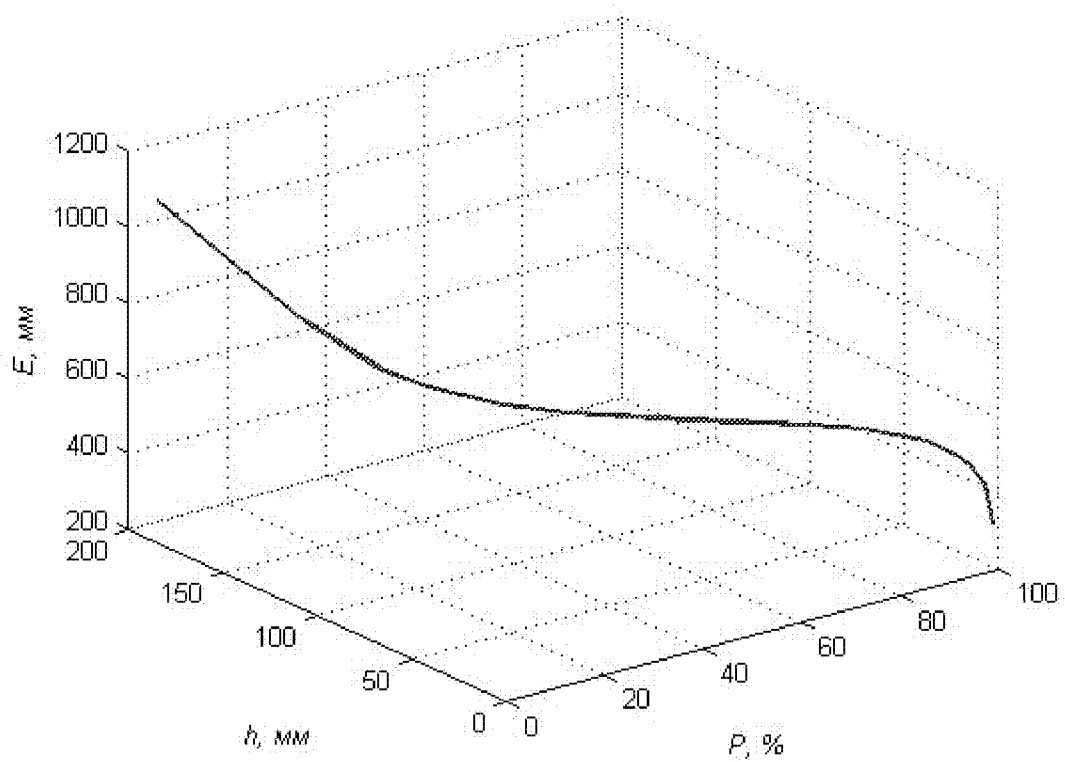
x)

1234680



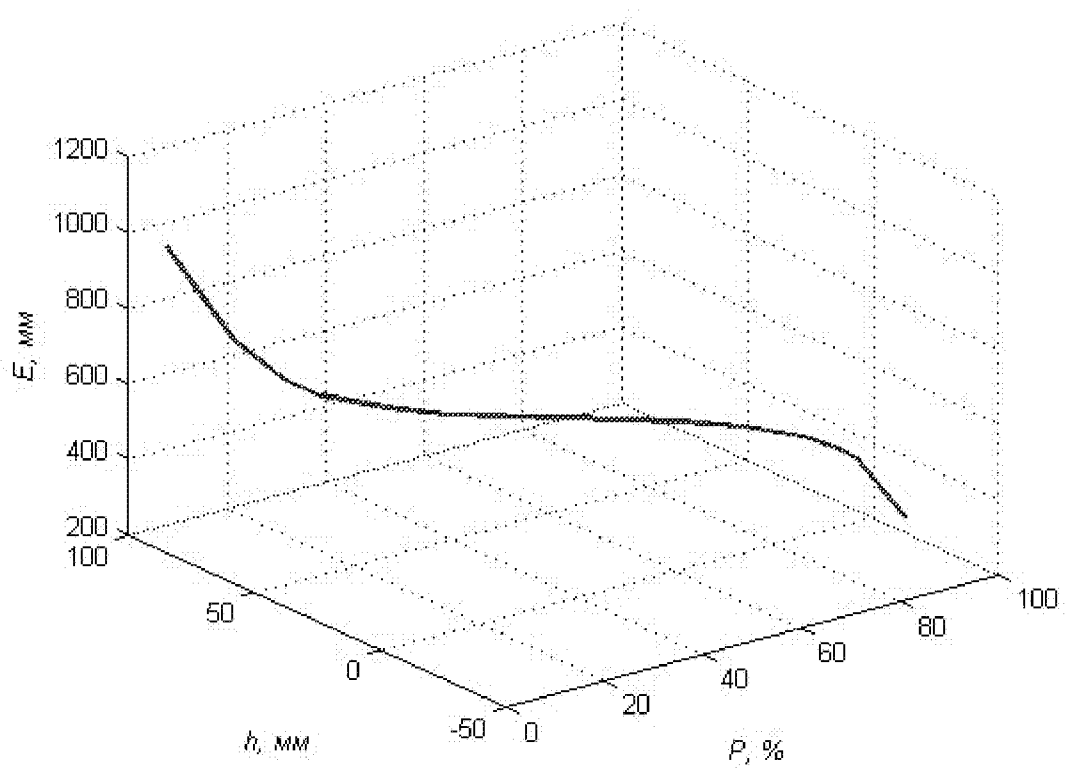
у)

1234120



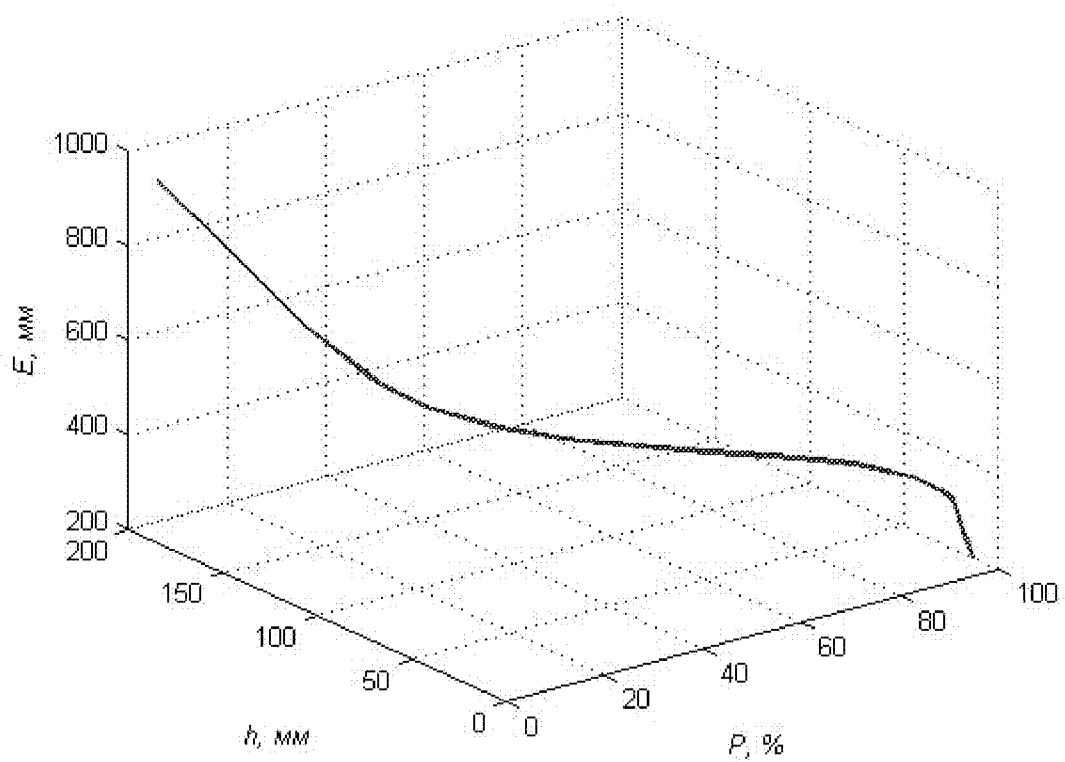
у)

1234050



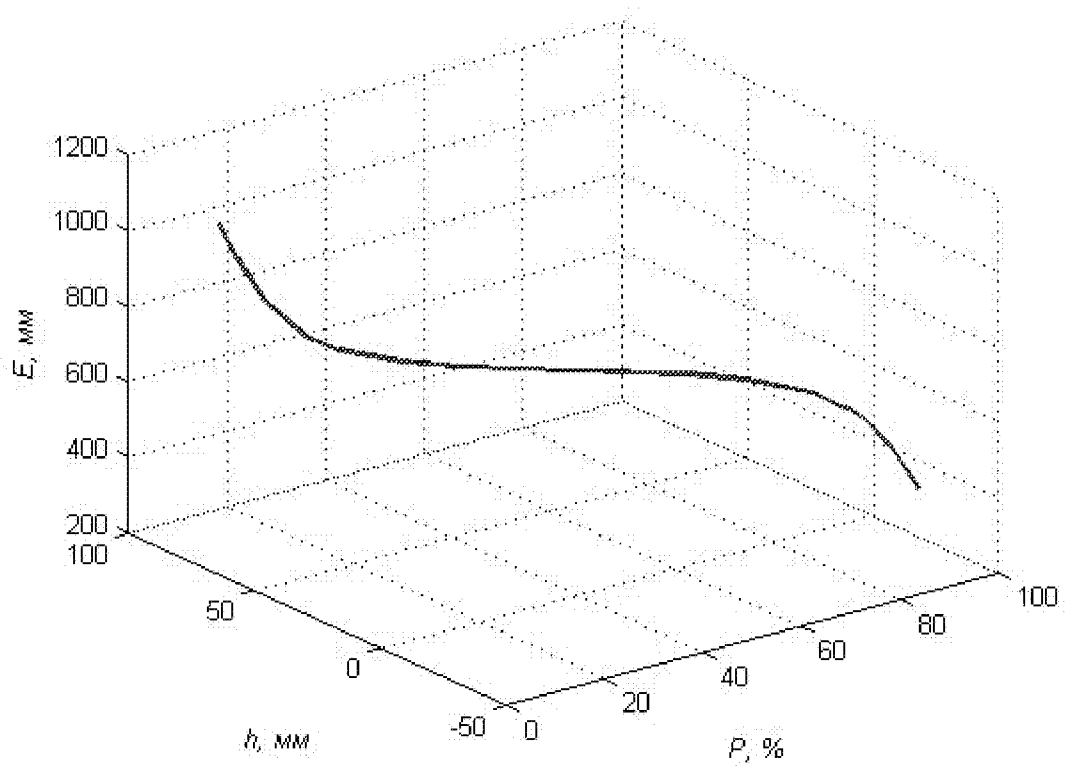
u)

1234130



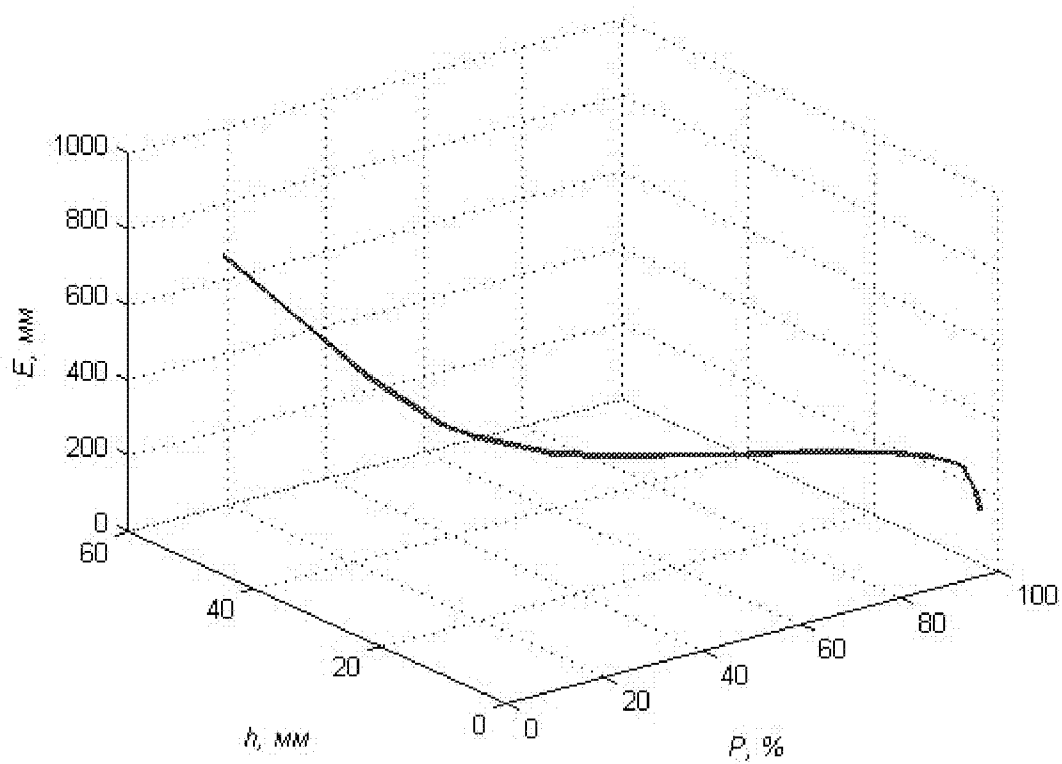
u)

1234080



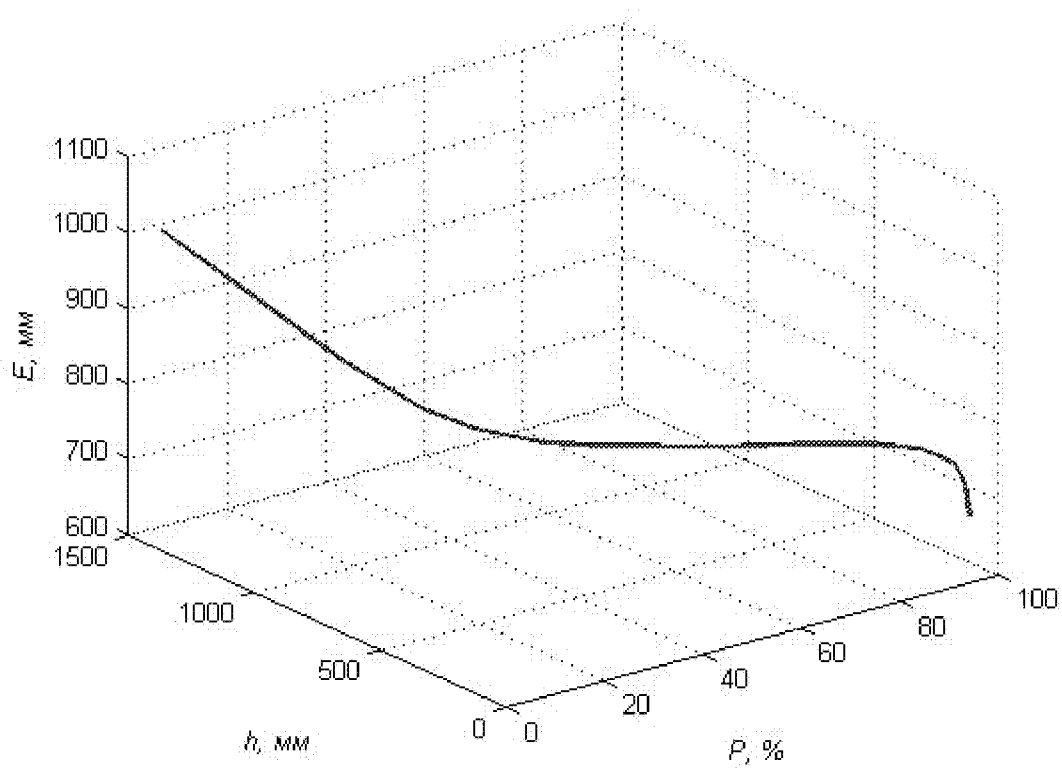
9)

1337251



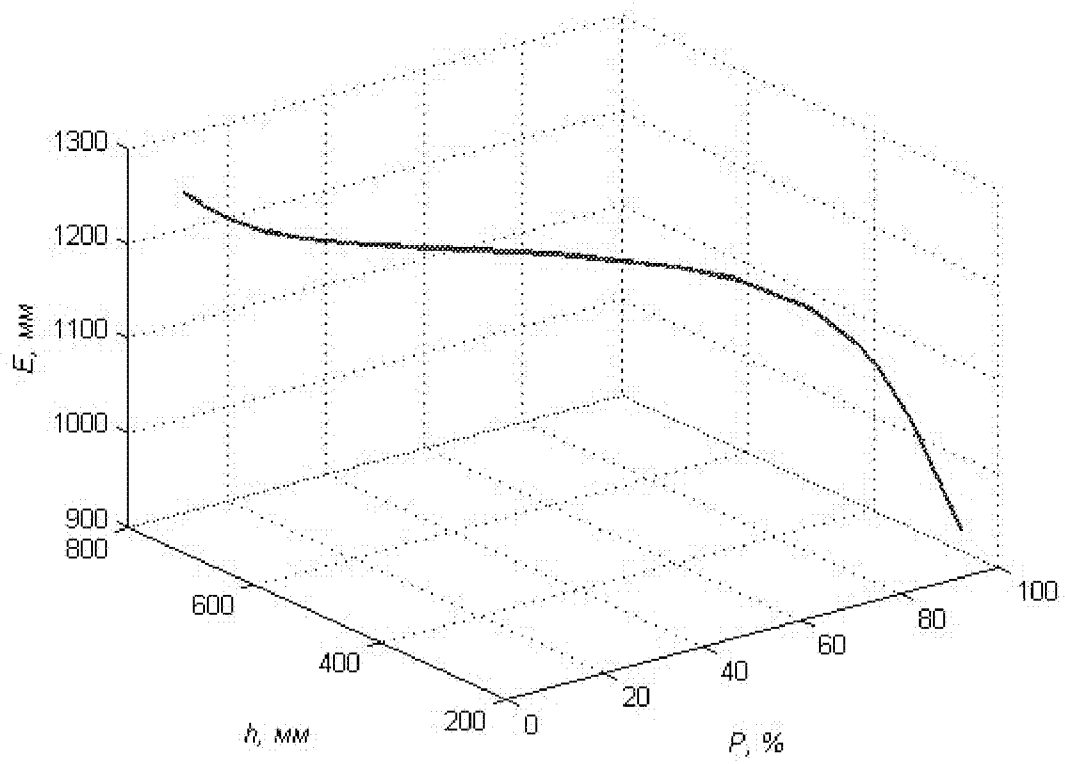
10)

1337151



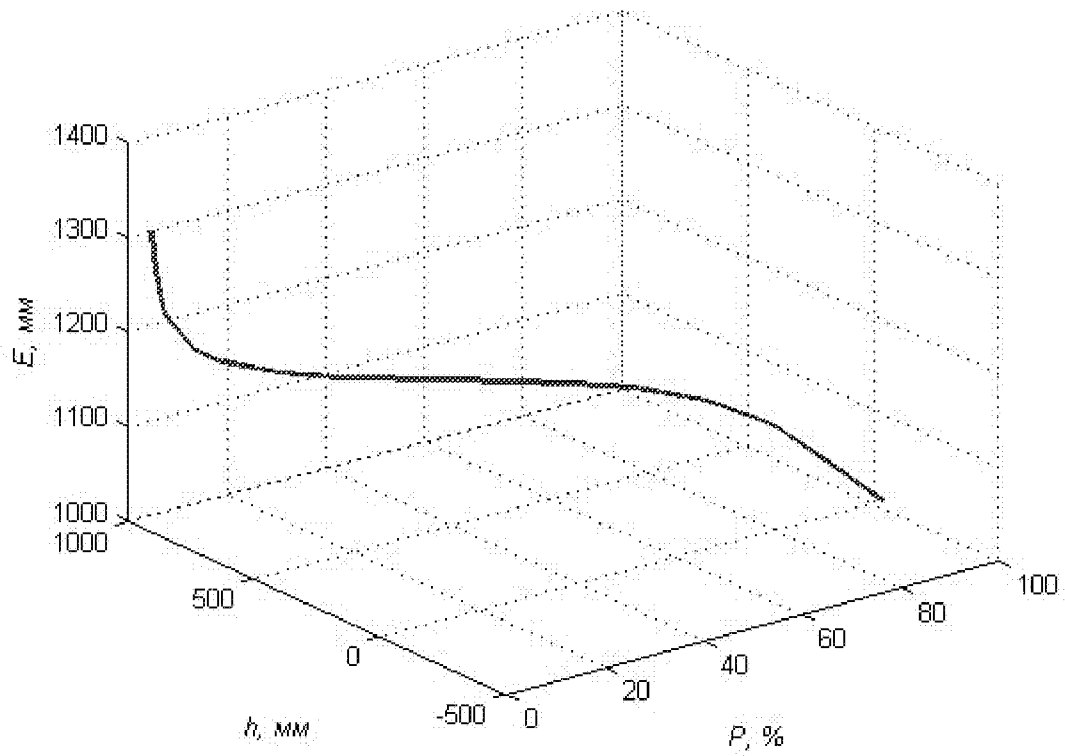
я)

1337100



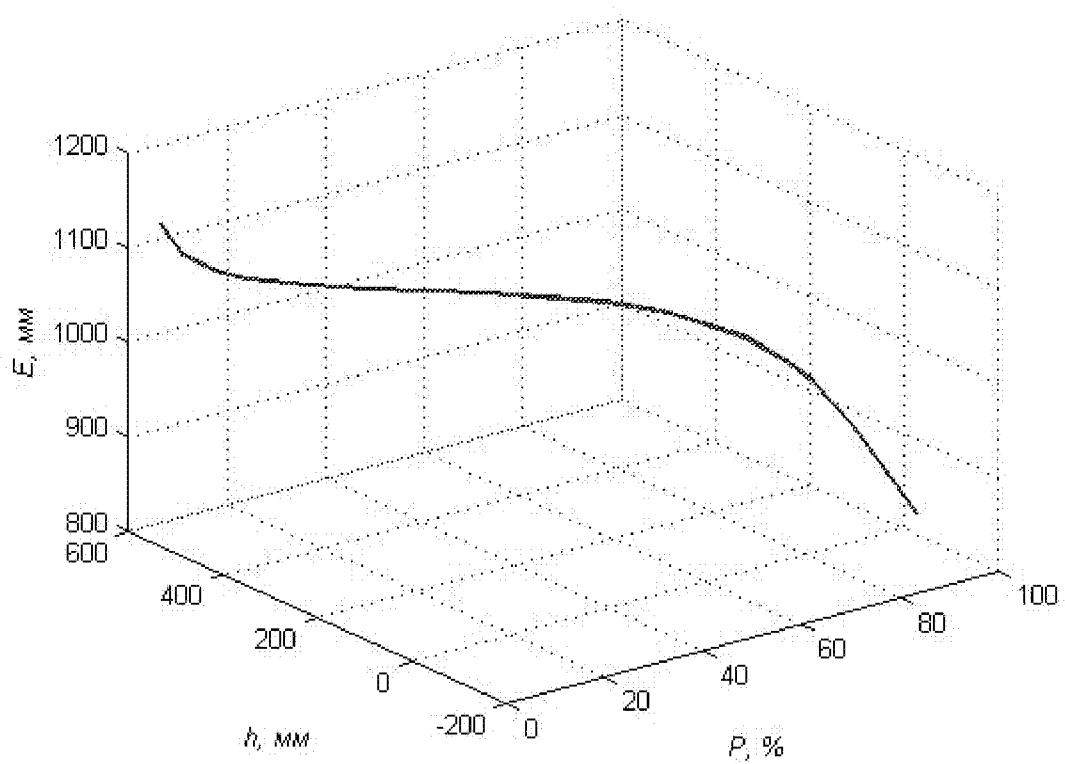
аа)

1338271



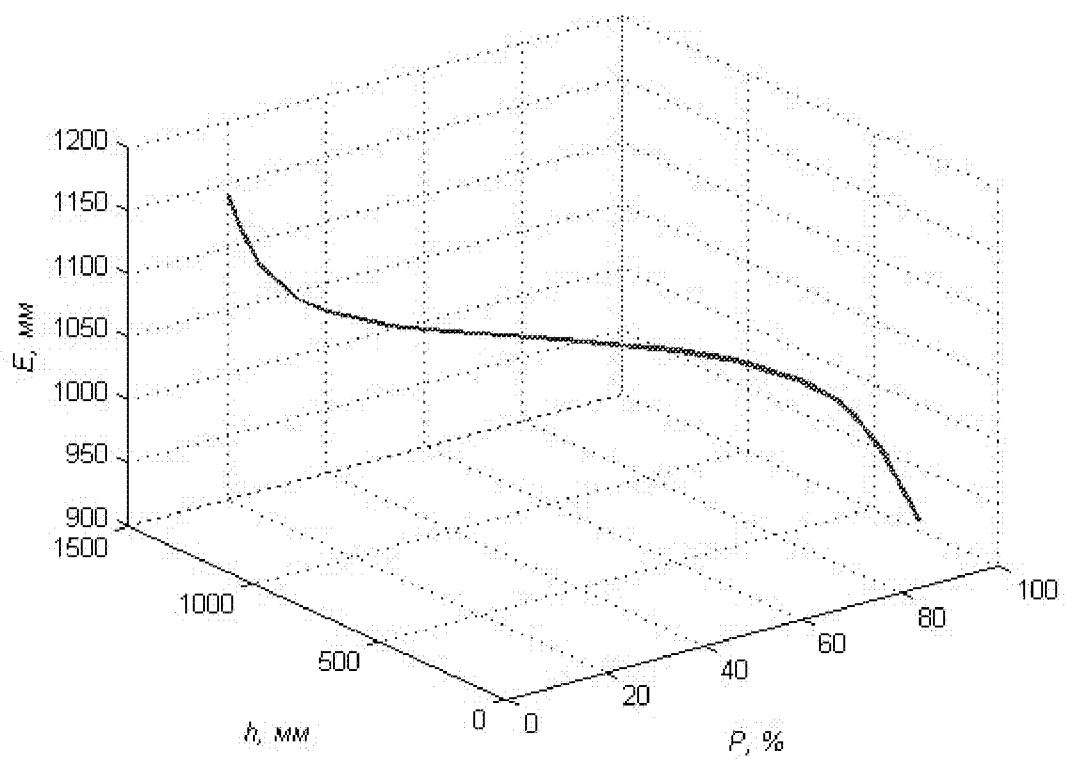
aб)

1338401



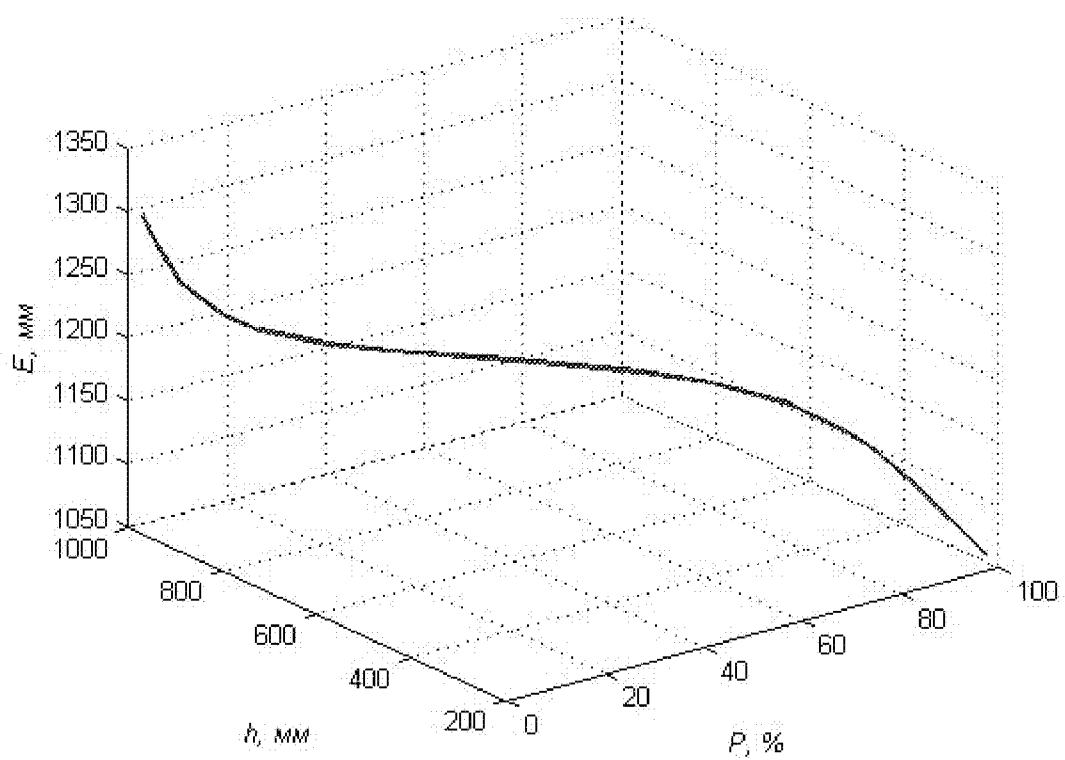
aв)

1338200



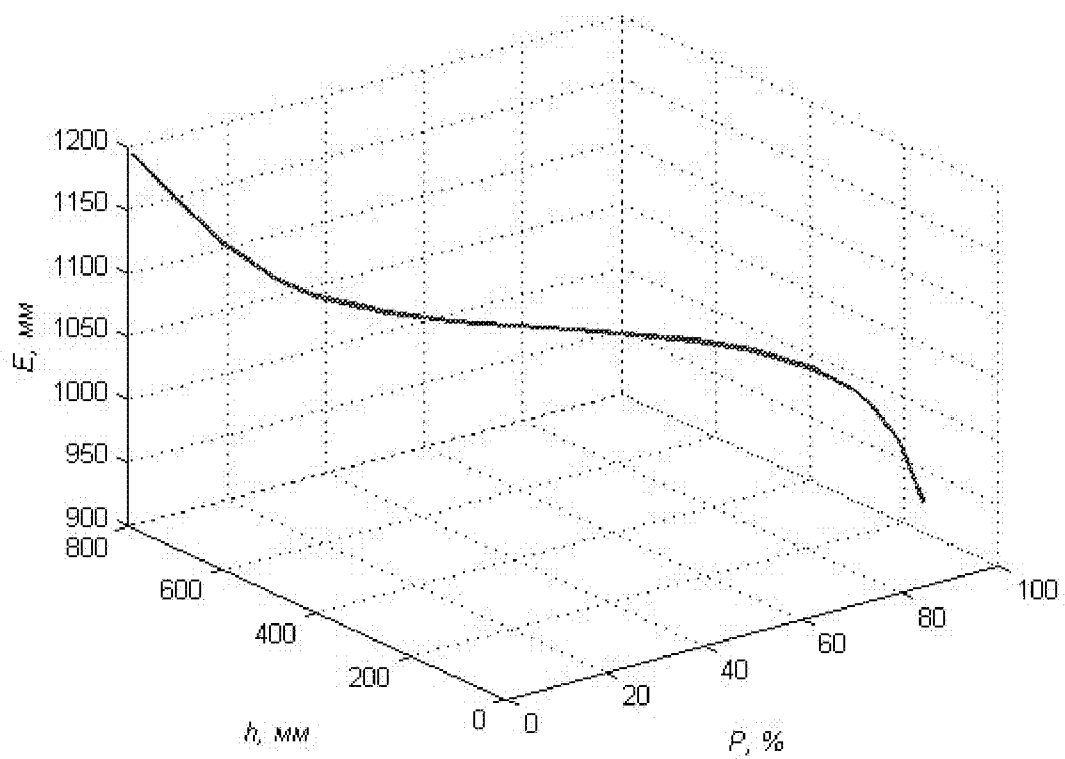
a2)

1348100



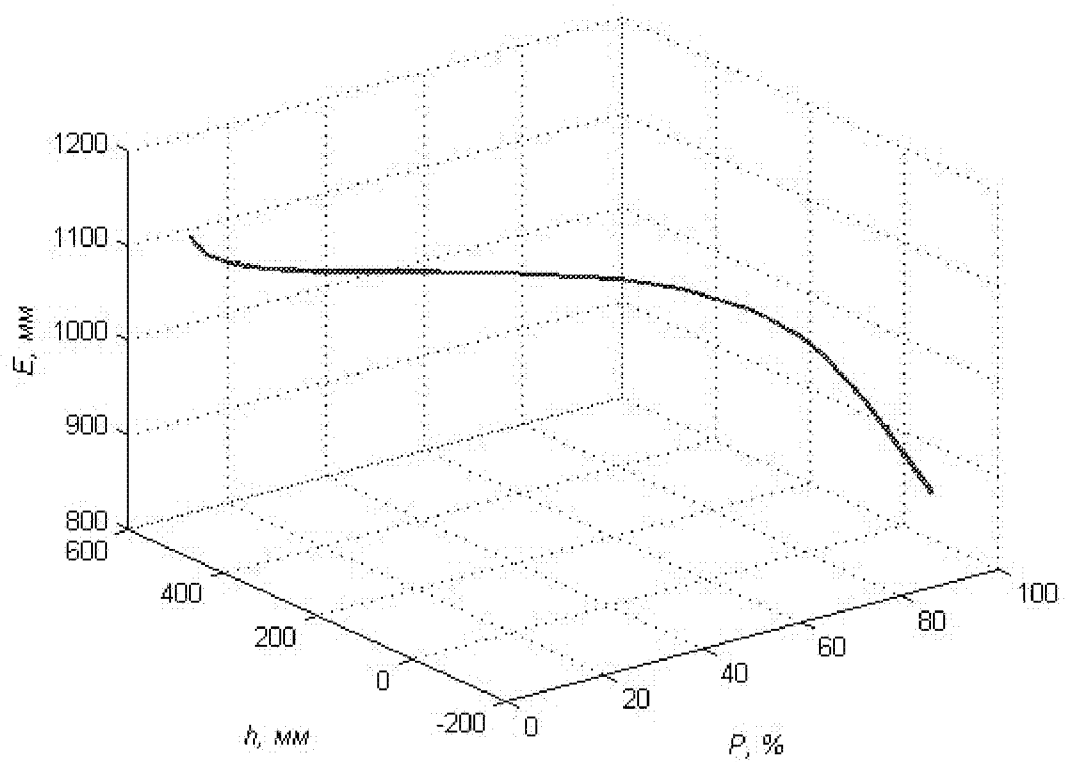
a0)

1339012



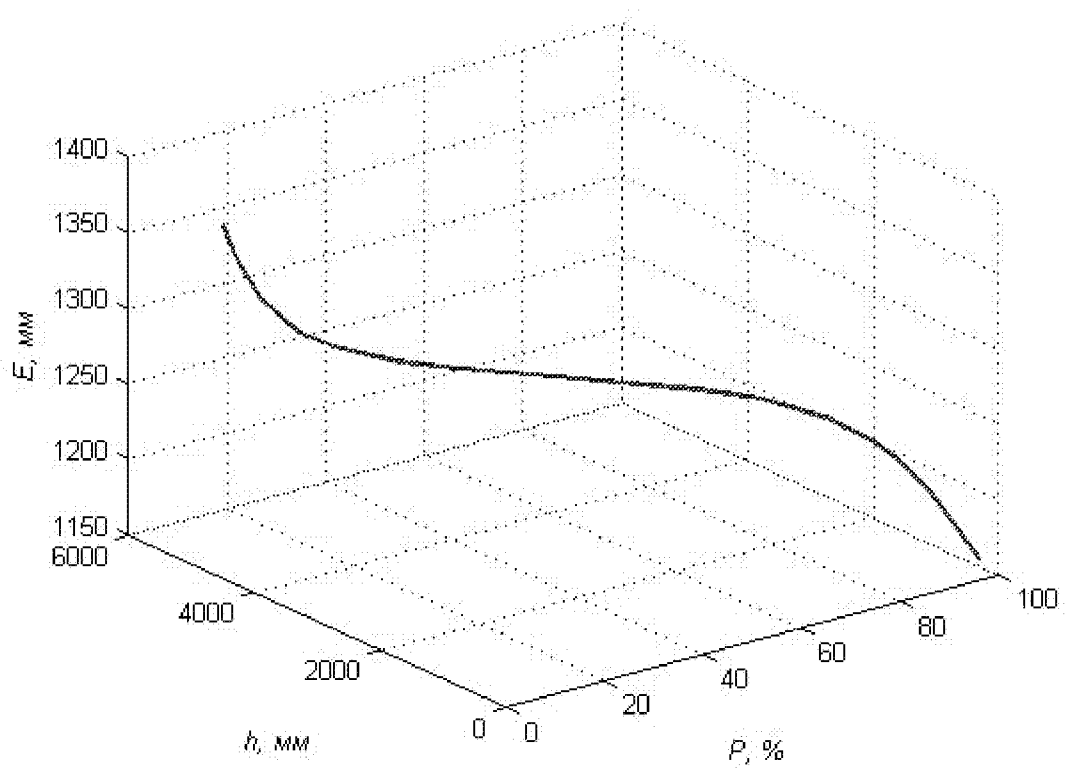
ae)

1336500



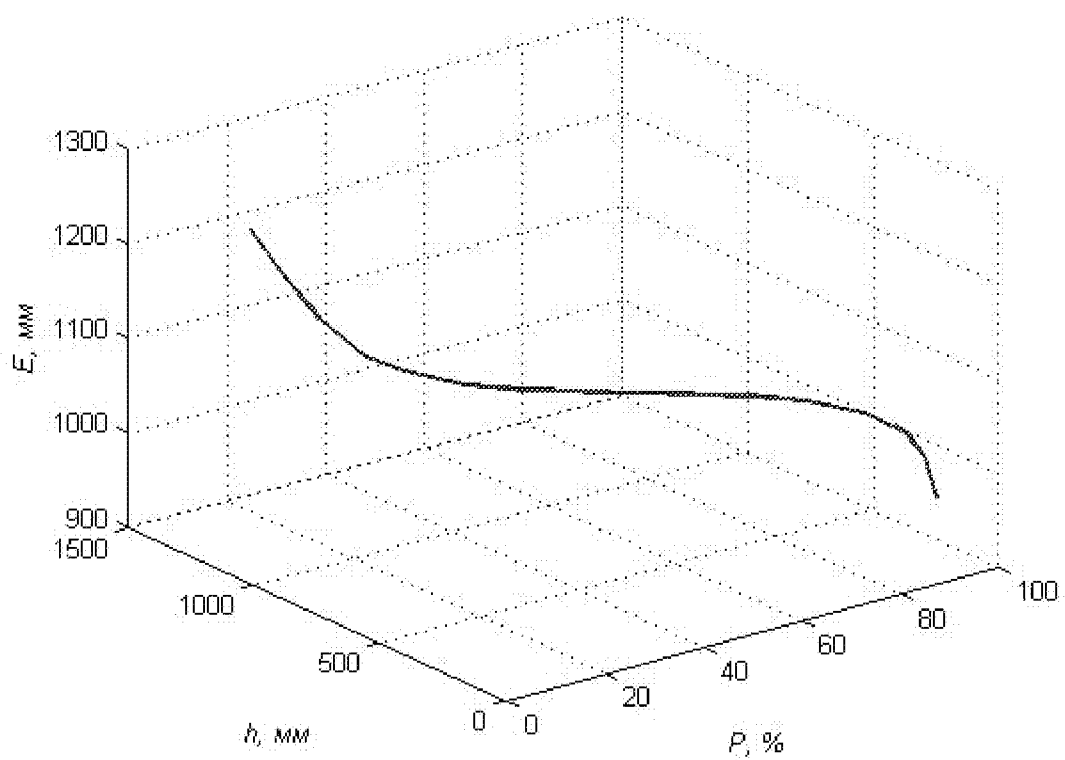
ажс)

1337200



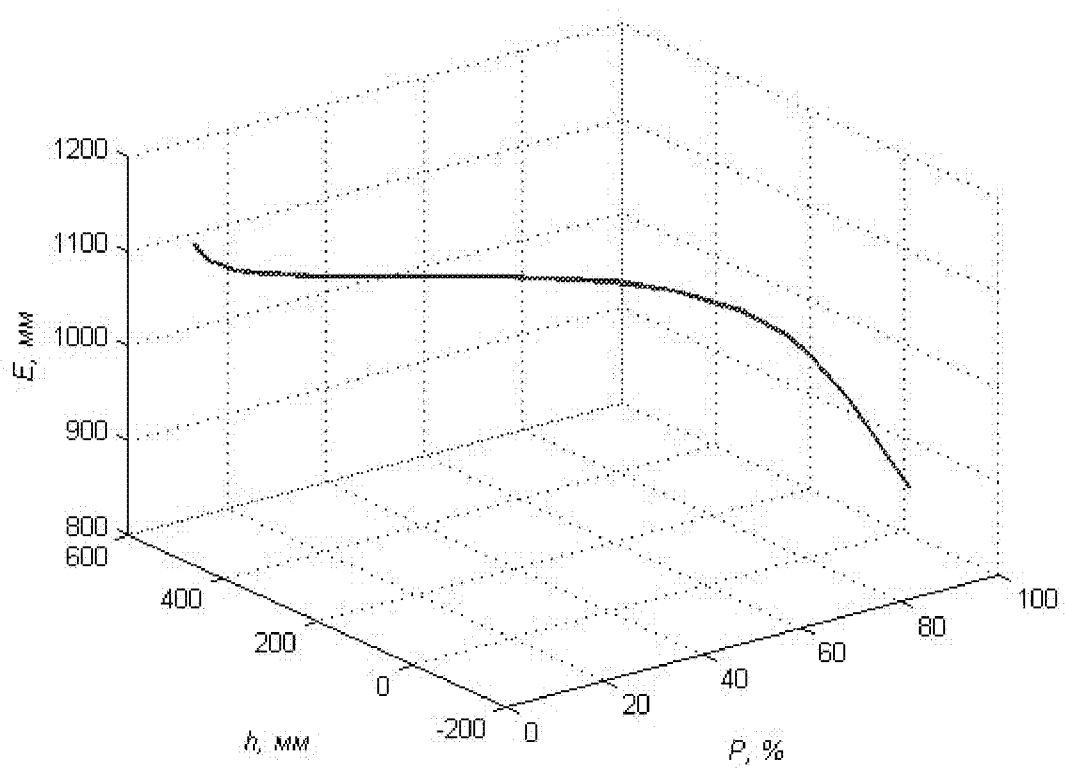
au)

1339011



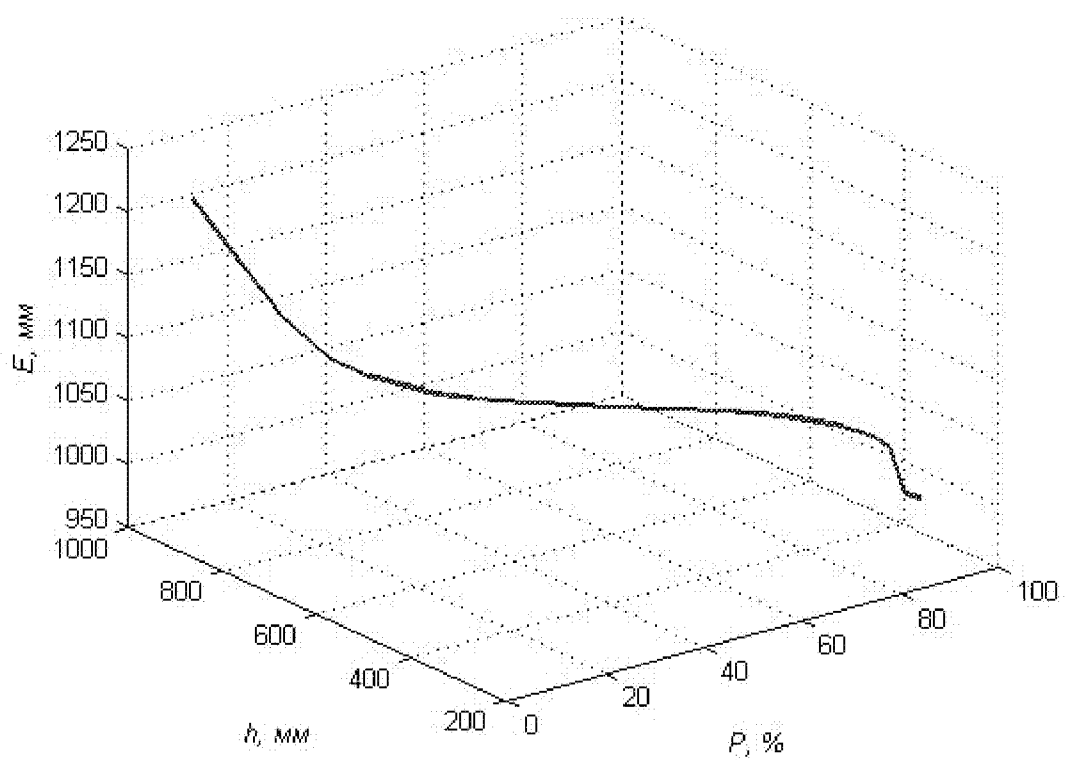
ak)

1348151



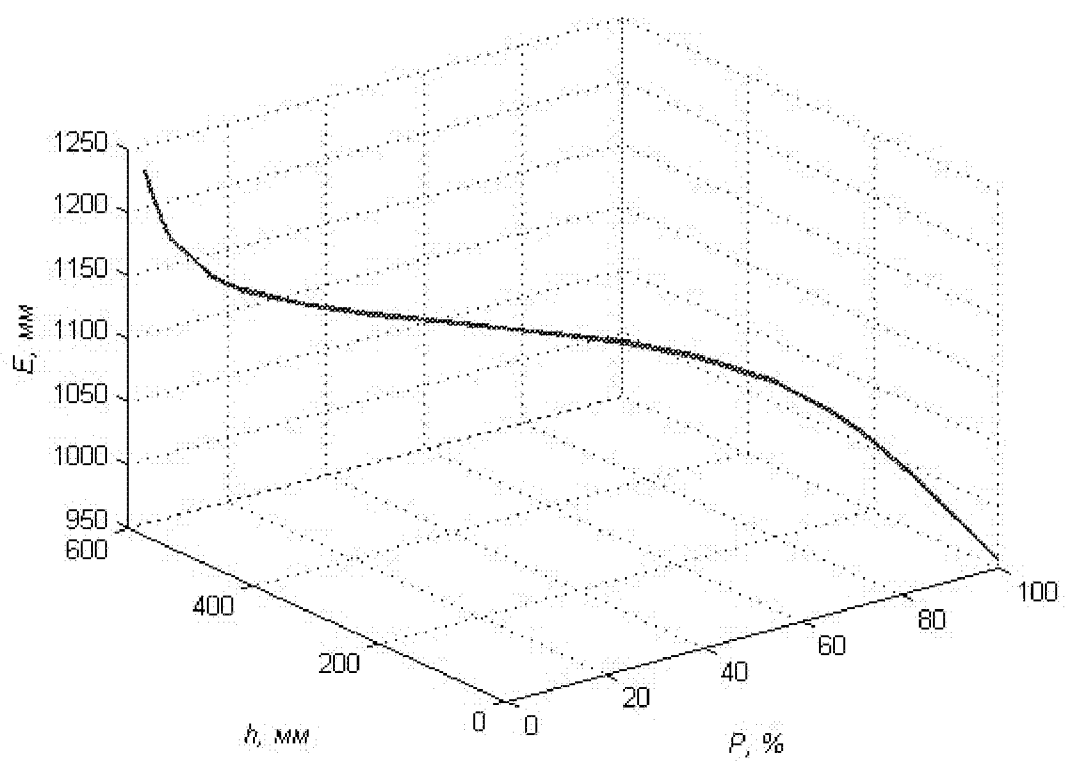
а))

1339015



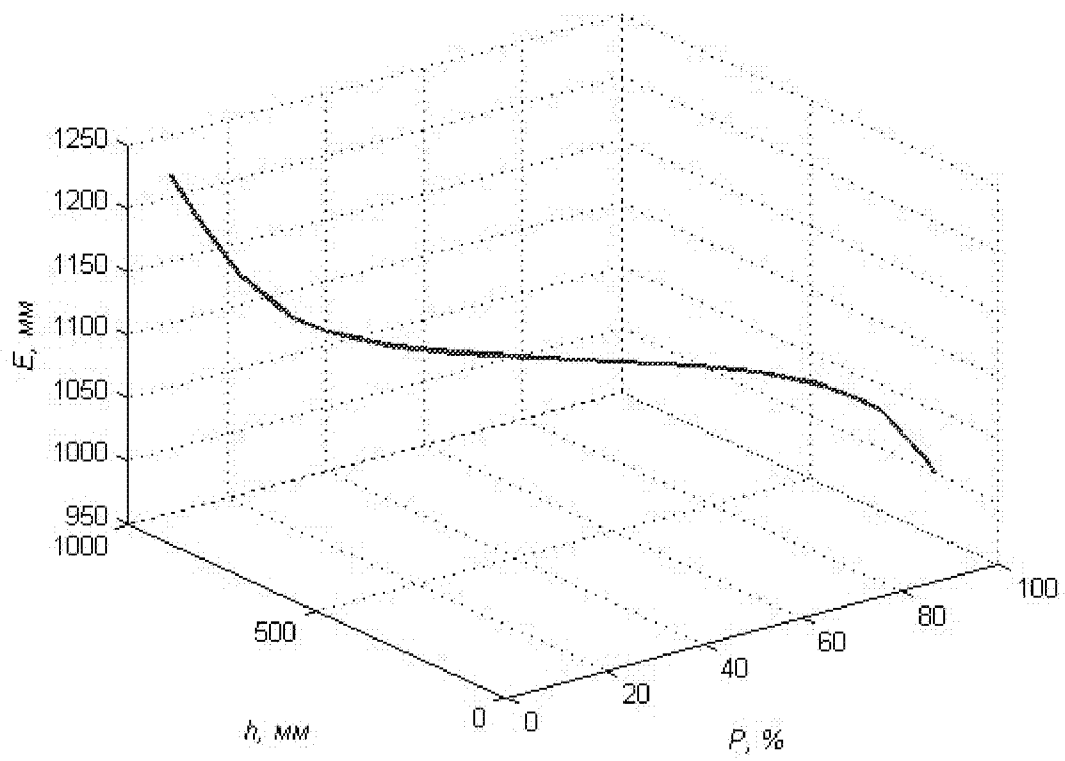
а))

1340500



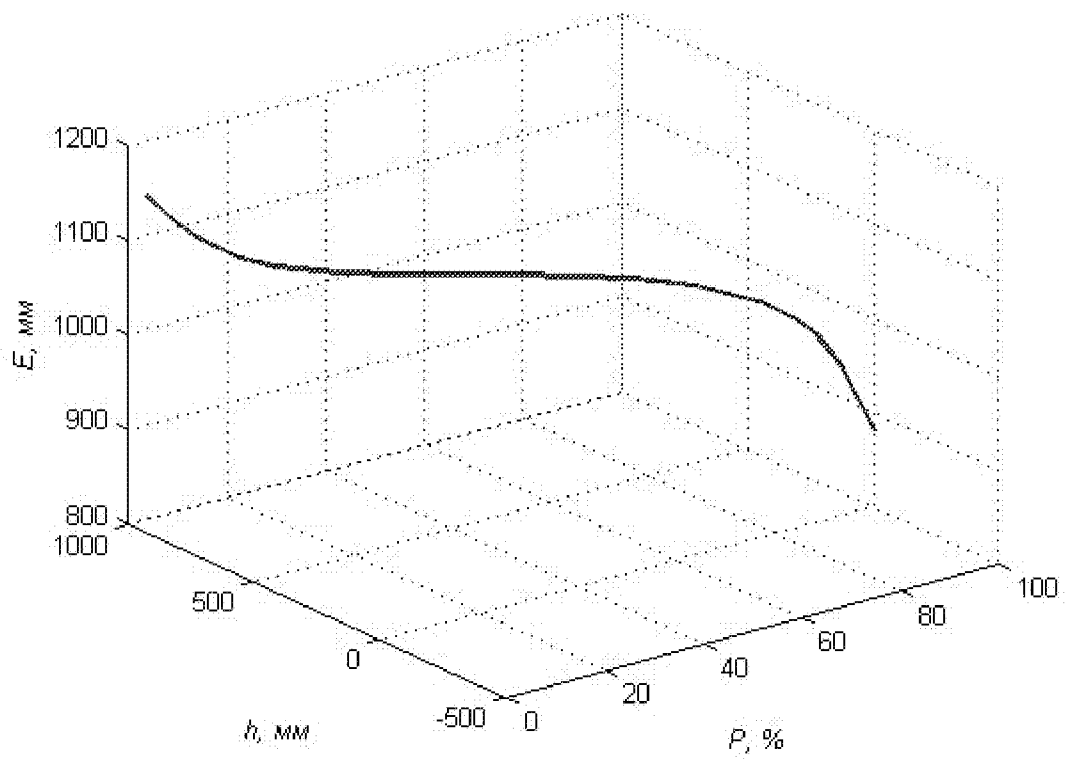
an)

1339017



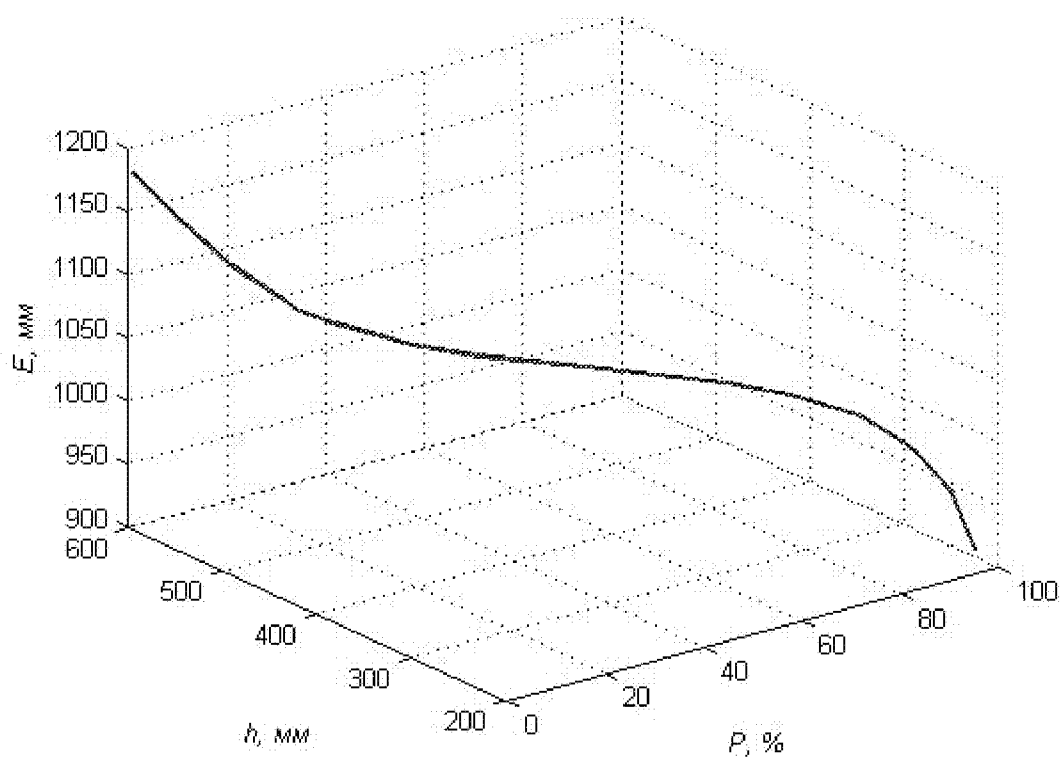
ao)

1348152



an)

1338600



ap)

1338300

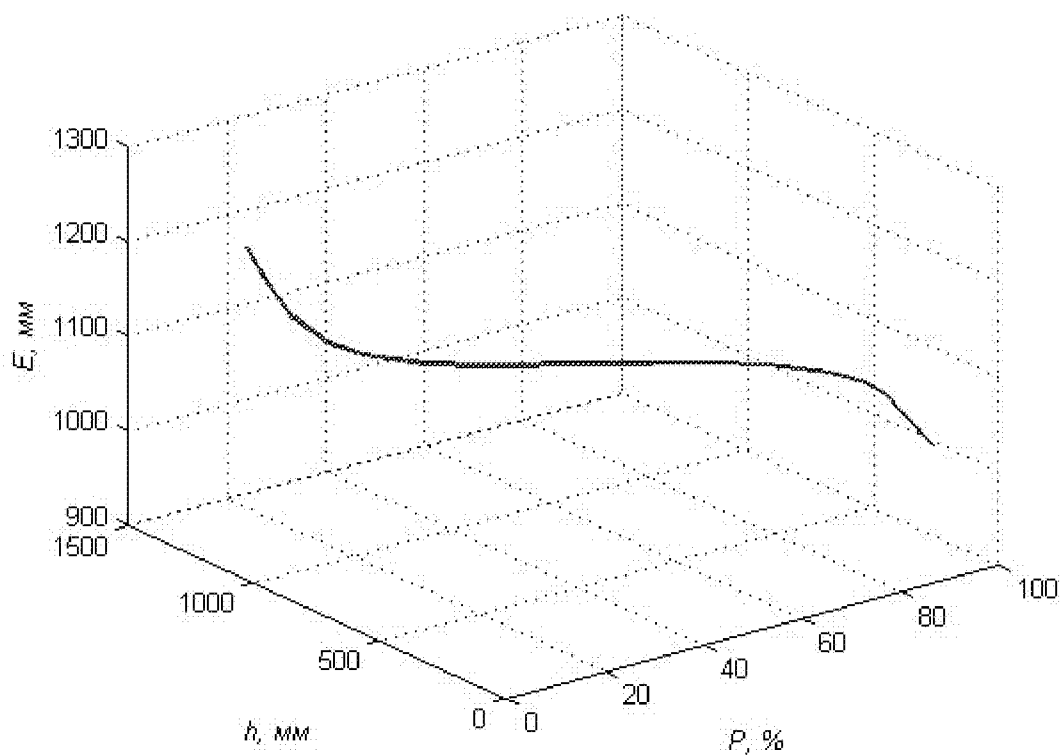
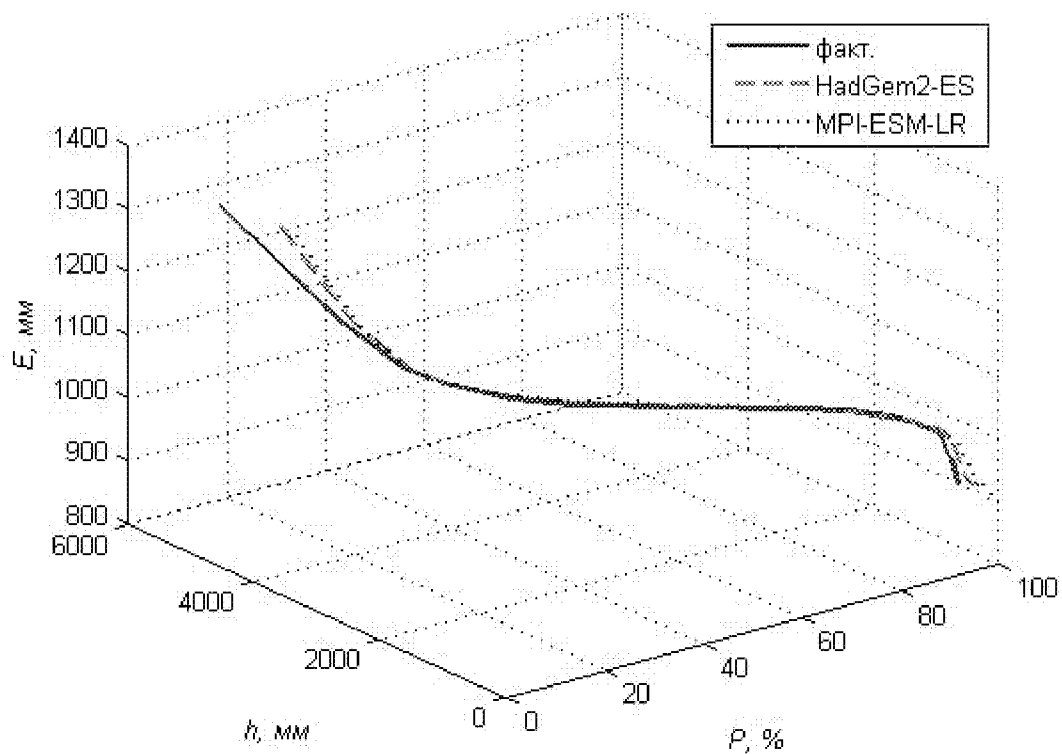


Рисунок Е.1 – Одномерные многообразия для речных бассейнов Западной Африки.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Прогнозные одномерные многообразия на 2016–2035 гг.

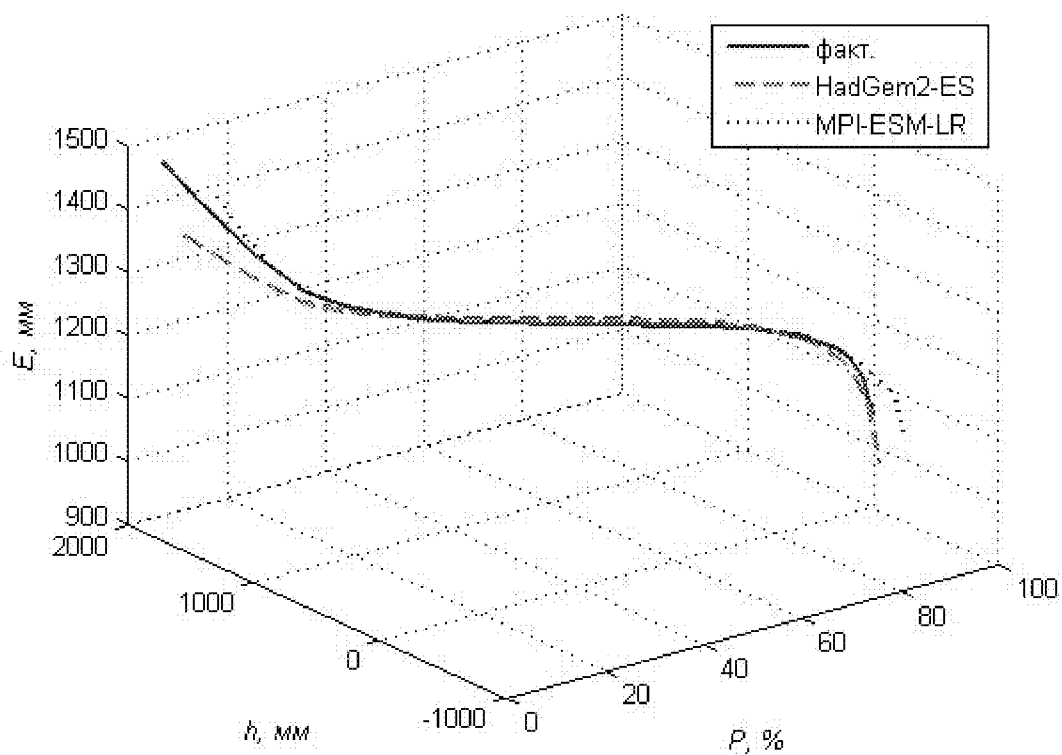
a)

1634550



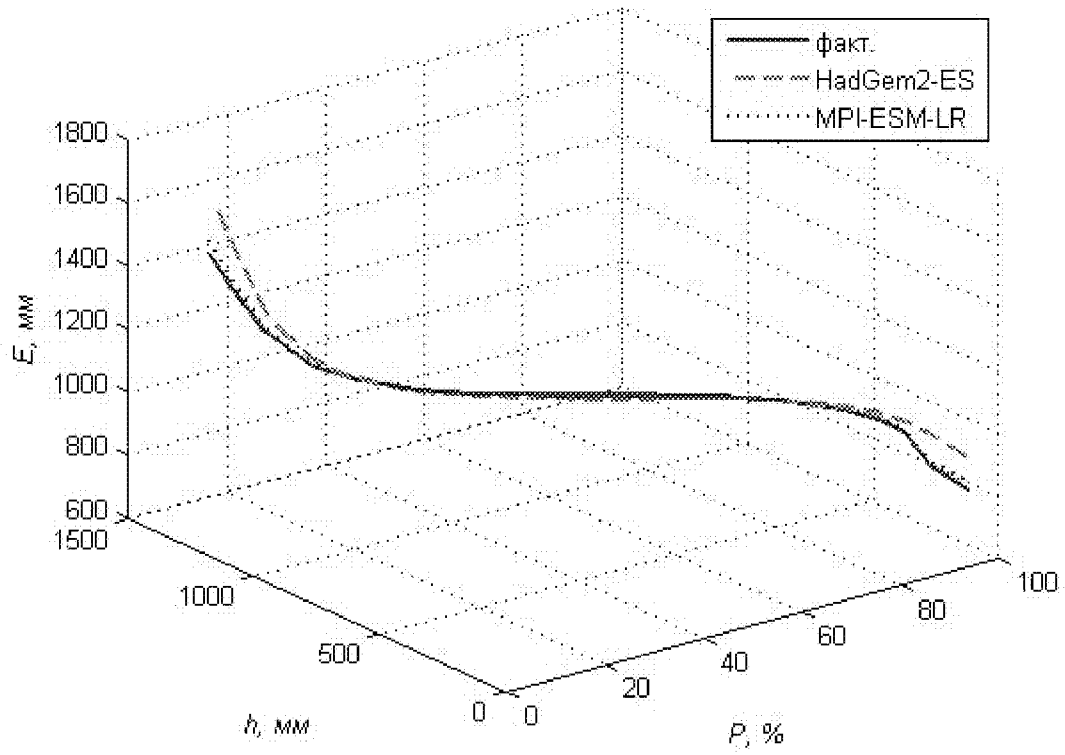
б)

1634100



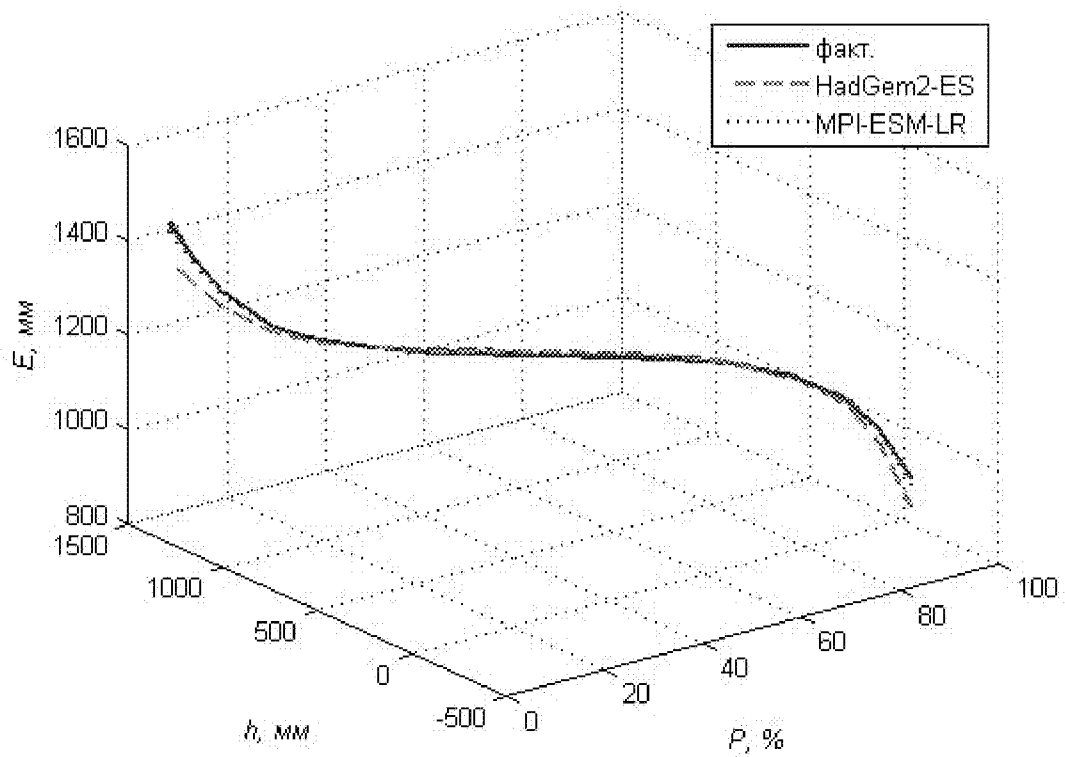
e)

1634500



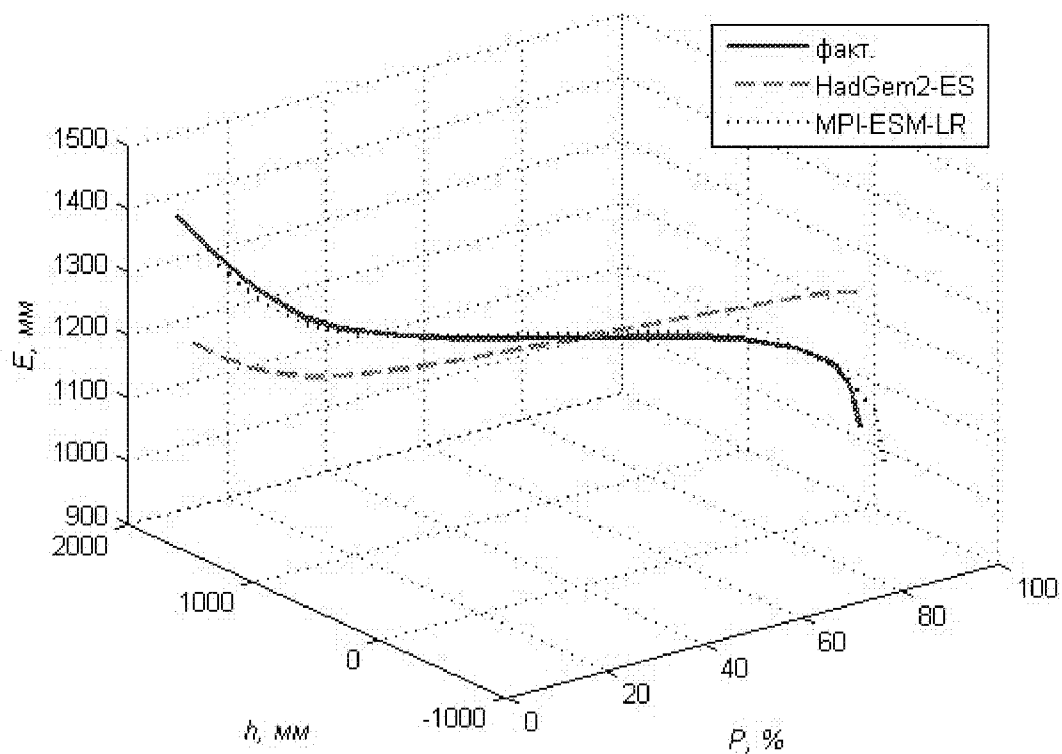
з)

1634420



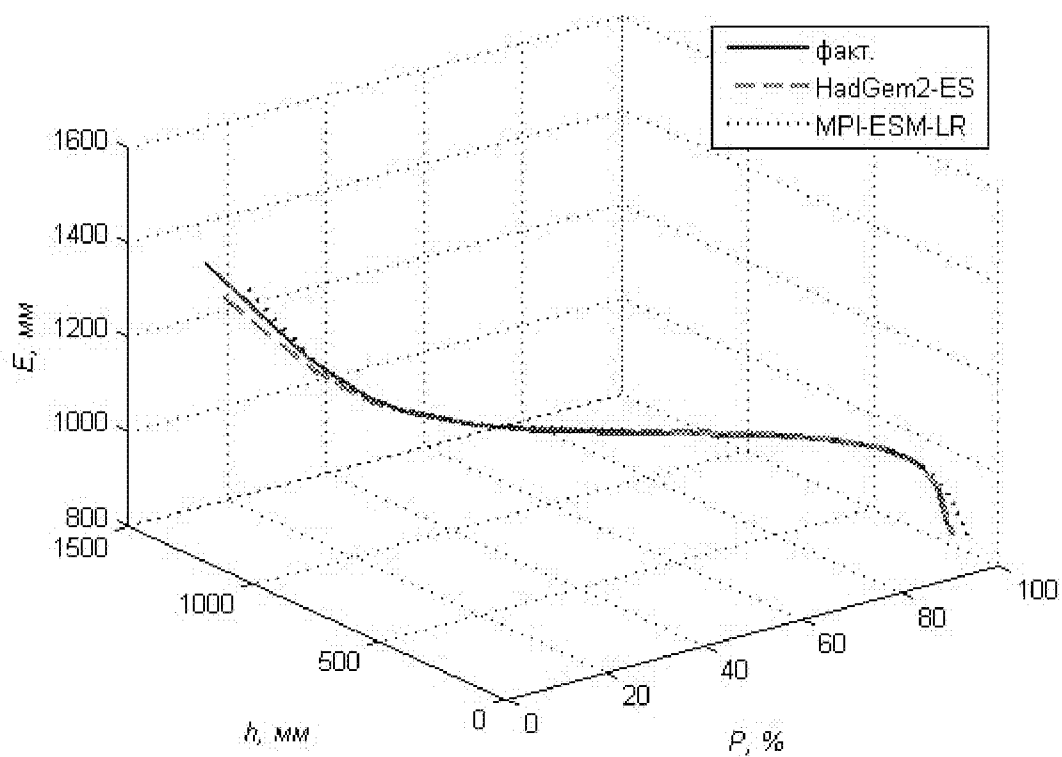
d)

1634400



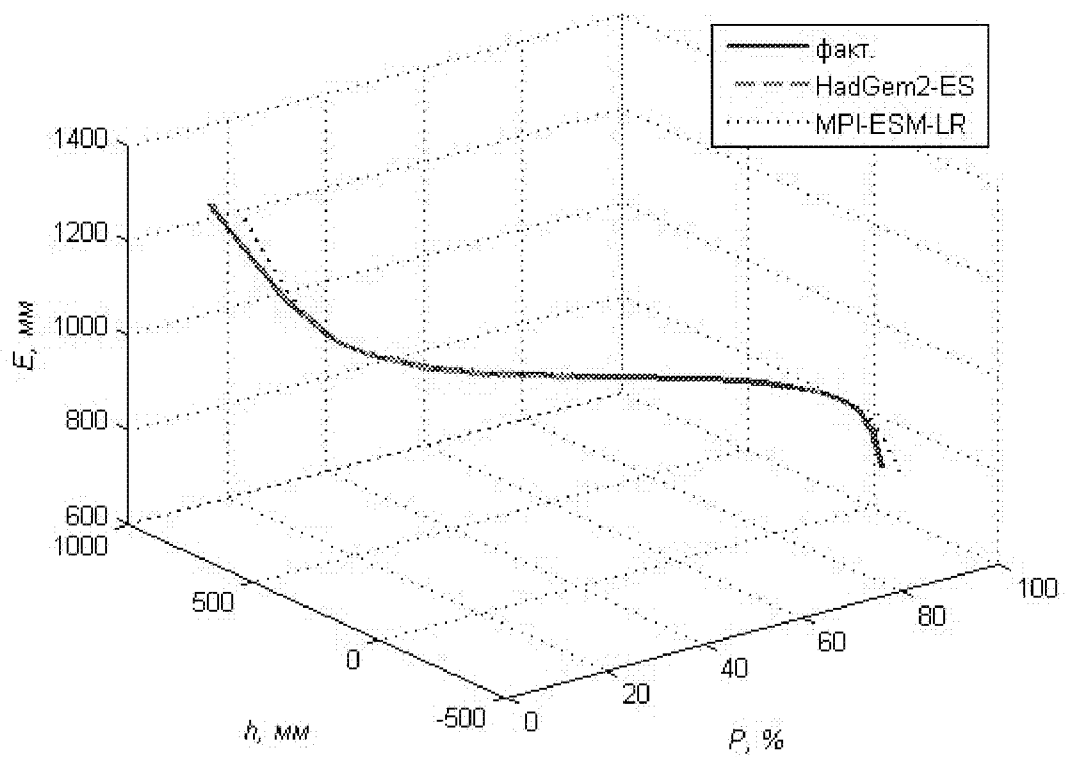
e)

1634800



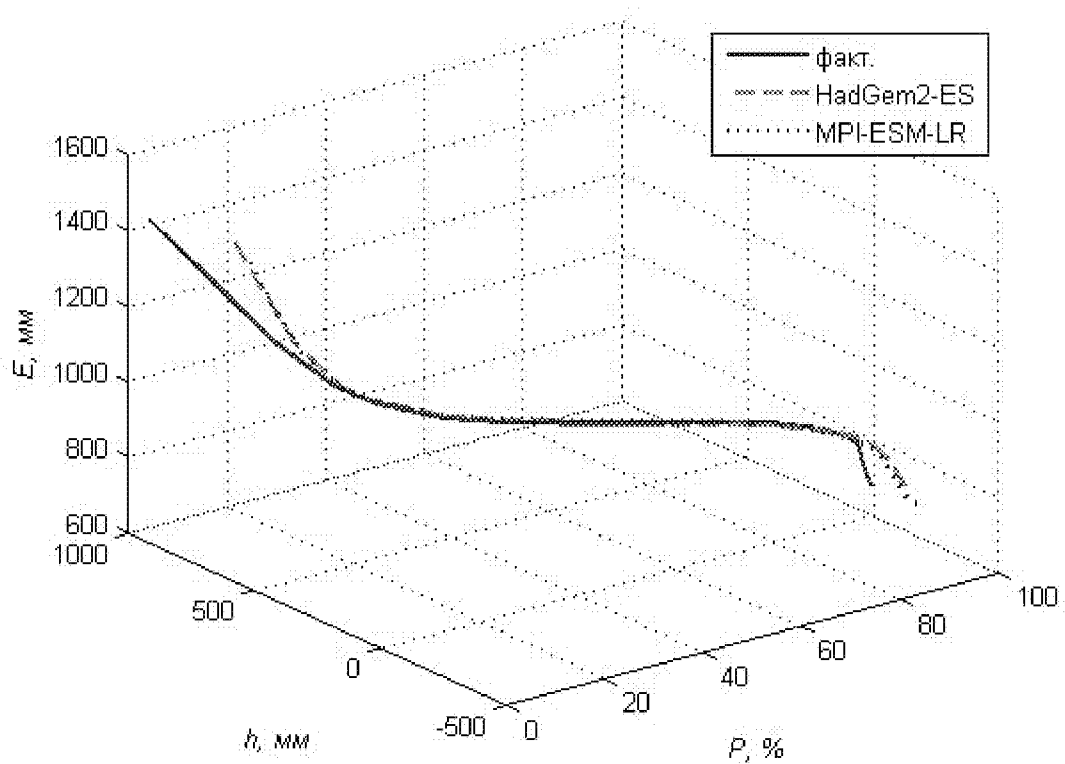
oic)

1734480



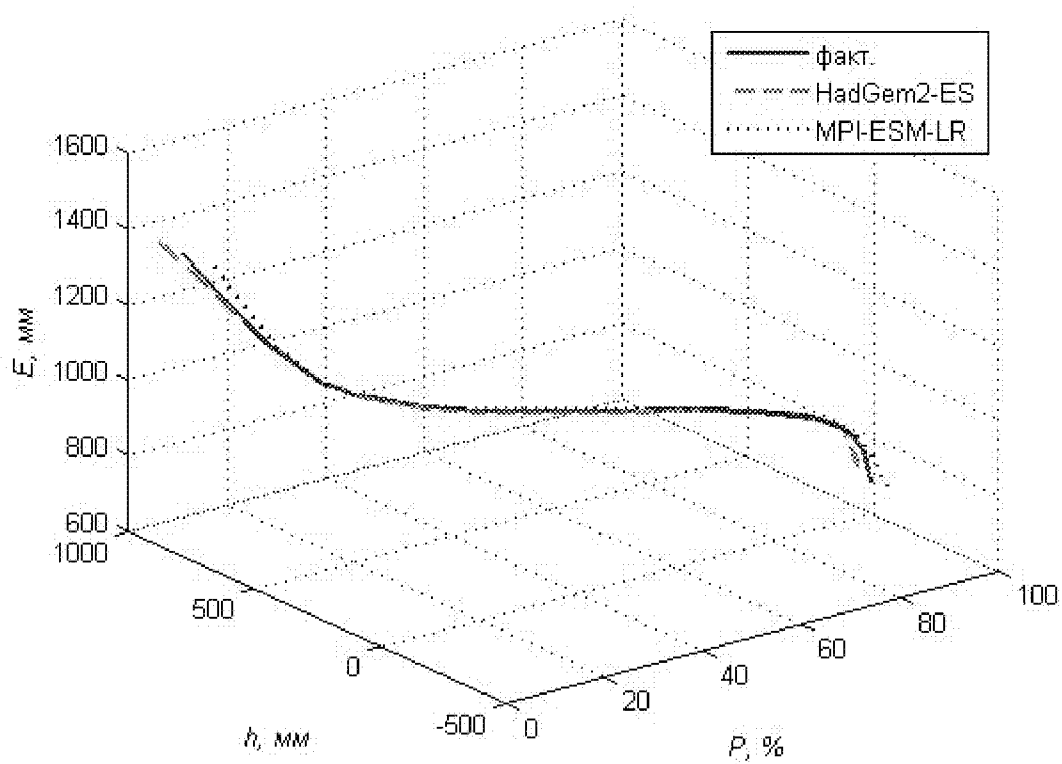
u)

1726100



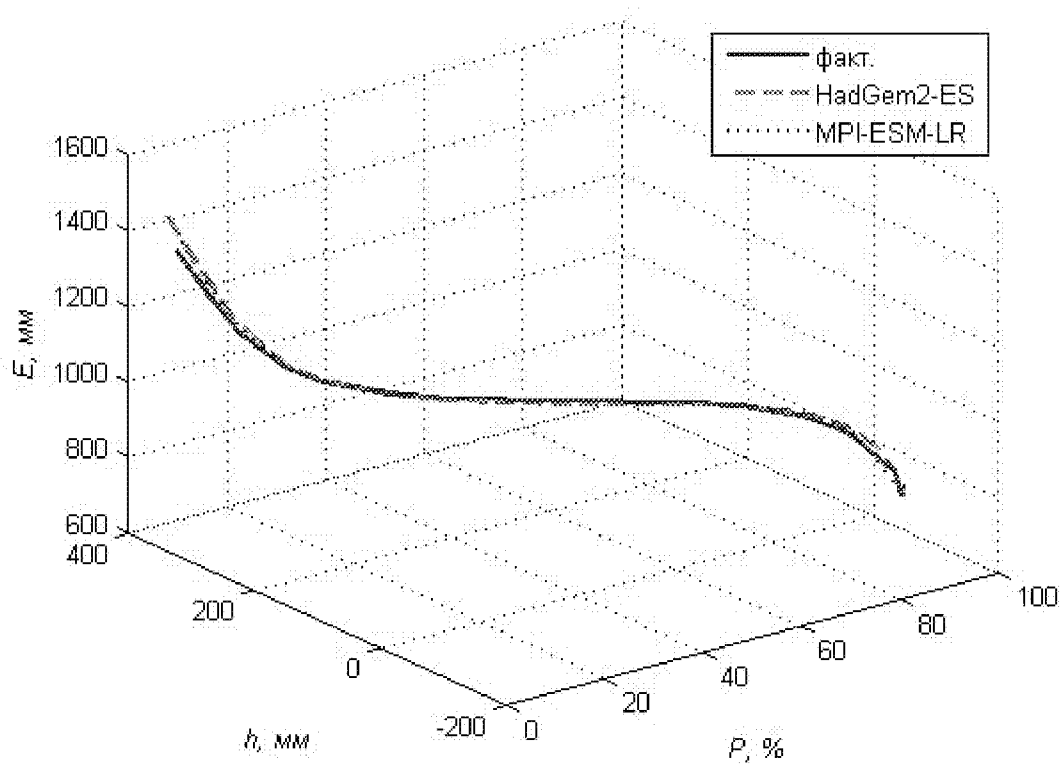
κ)

1734400



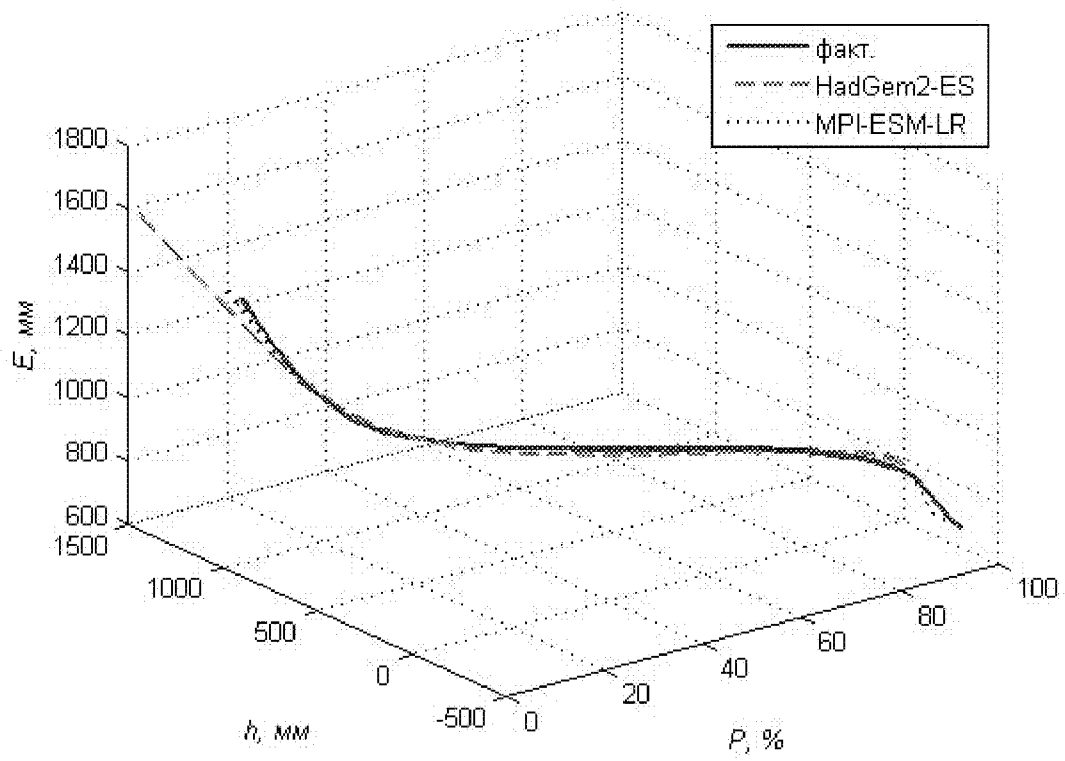
л)

1734410



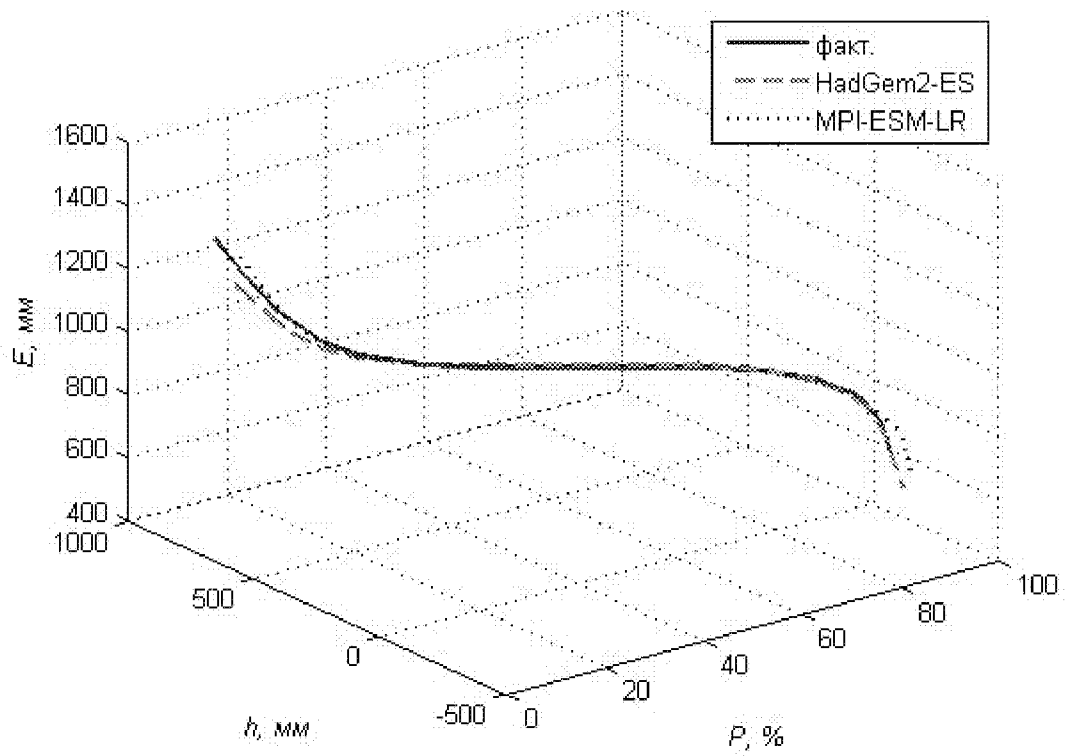
м)

1732100



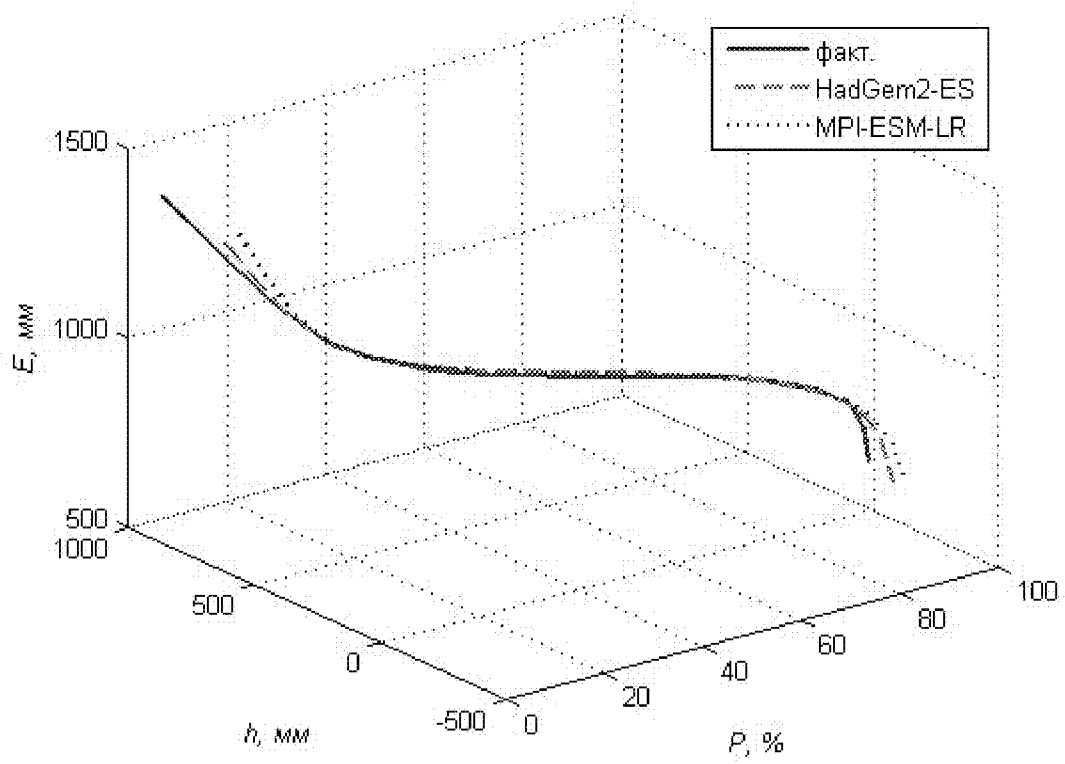
н)

1733300



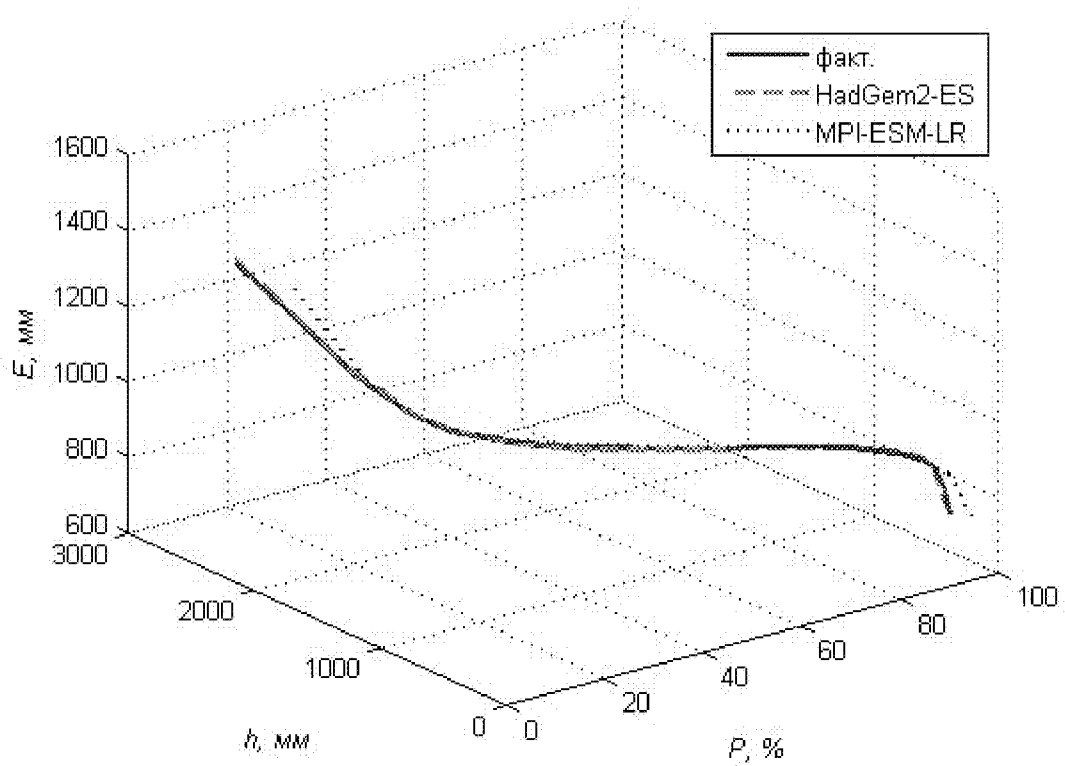
o)

1733600



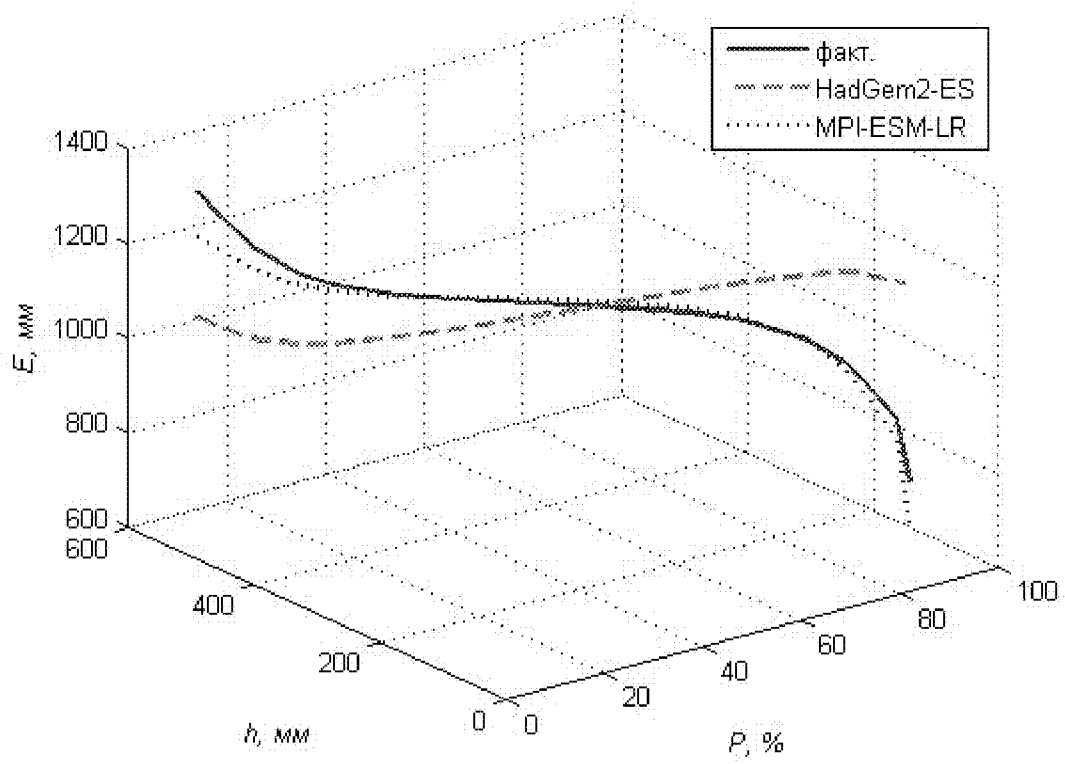
n)

1434780



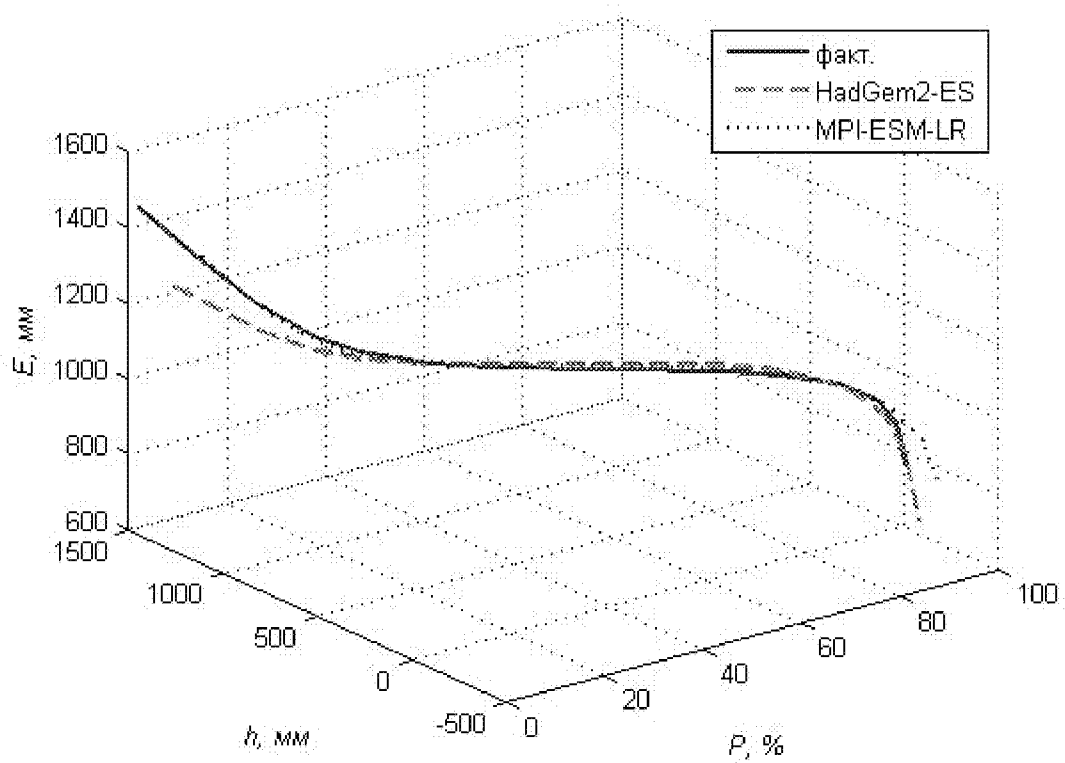
p)

1530100



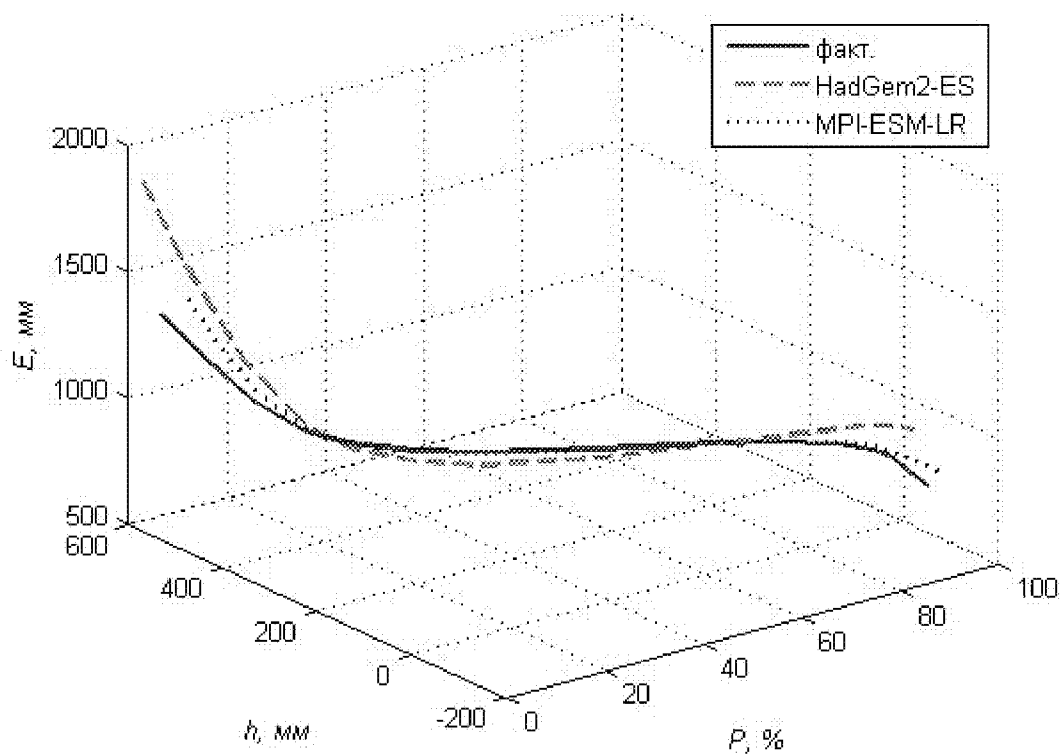
c)

1134040



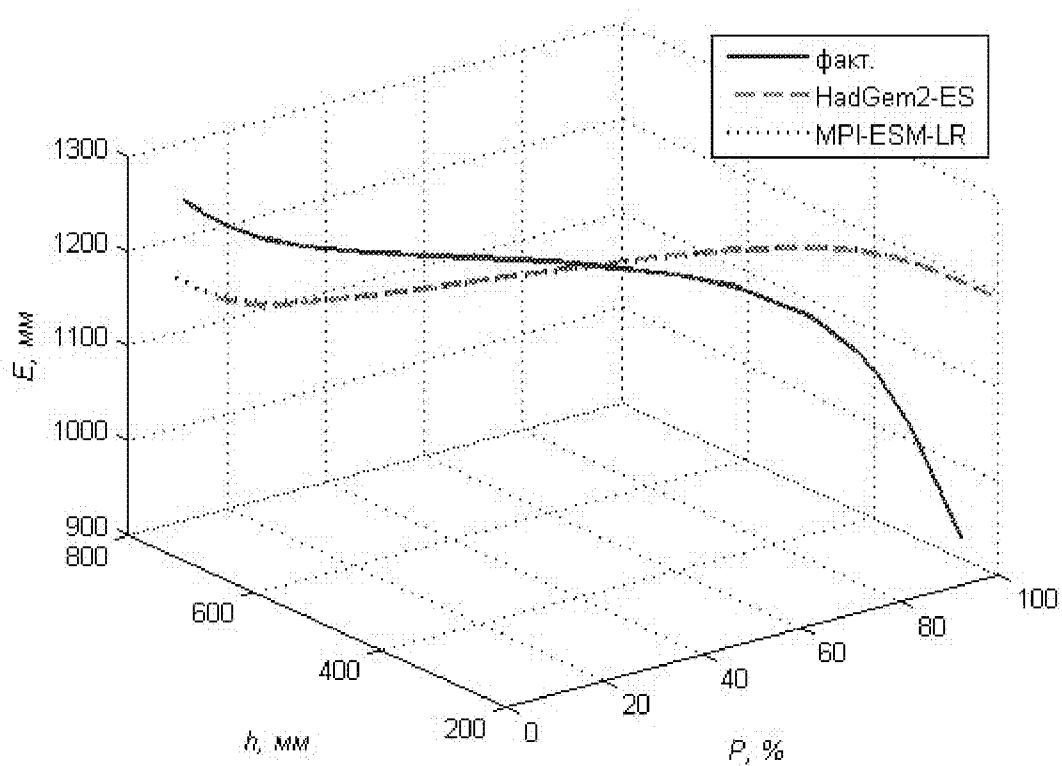
m)

1928745



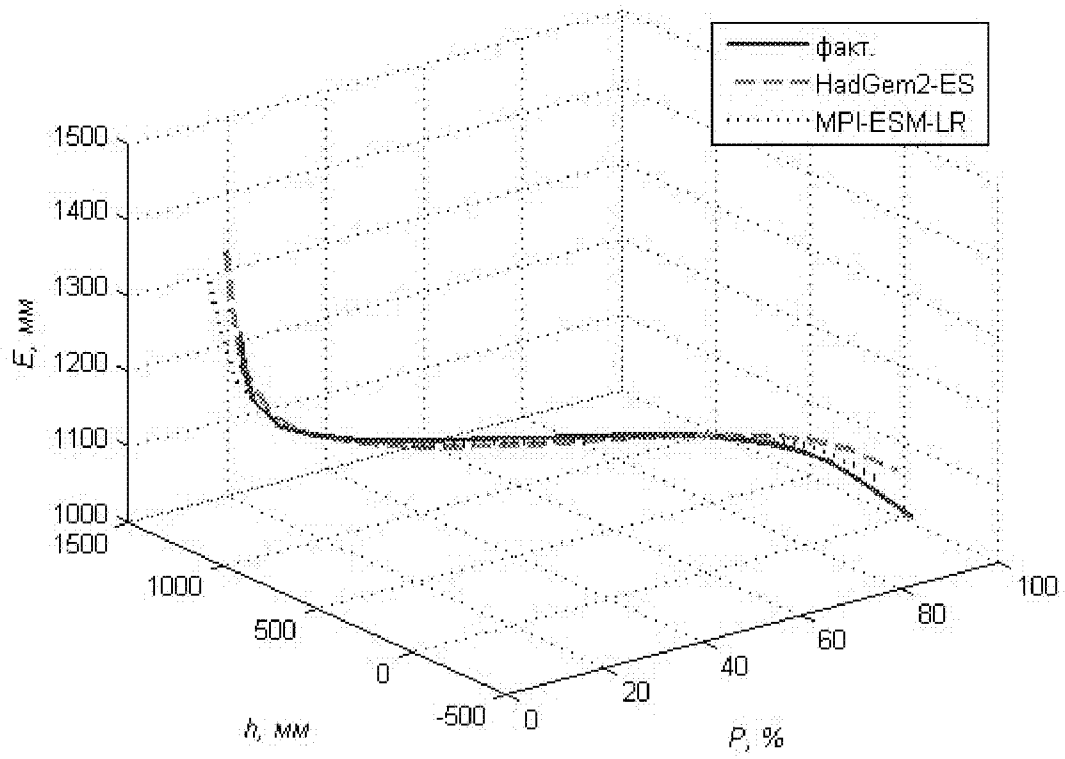
y)

1337151



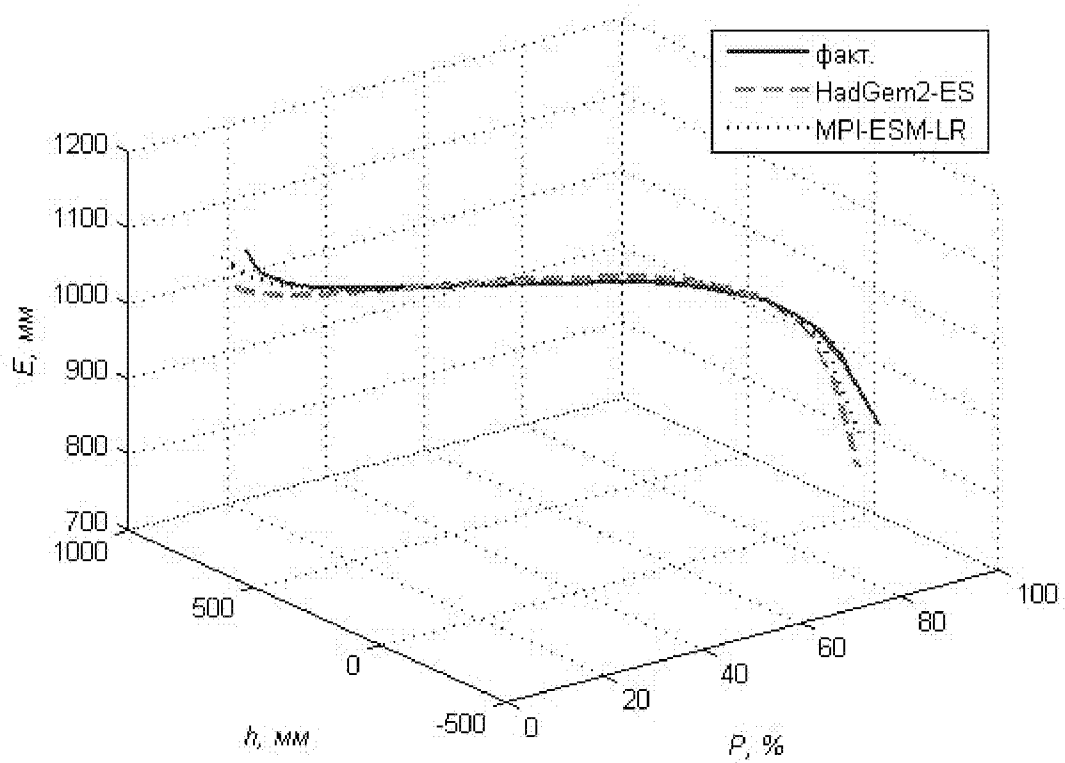
φ)

1337100



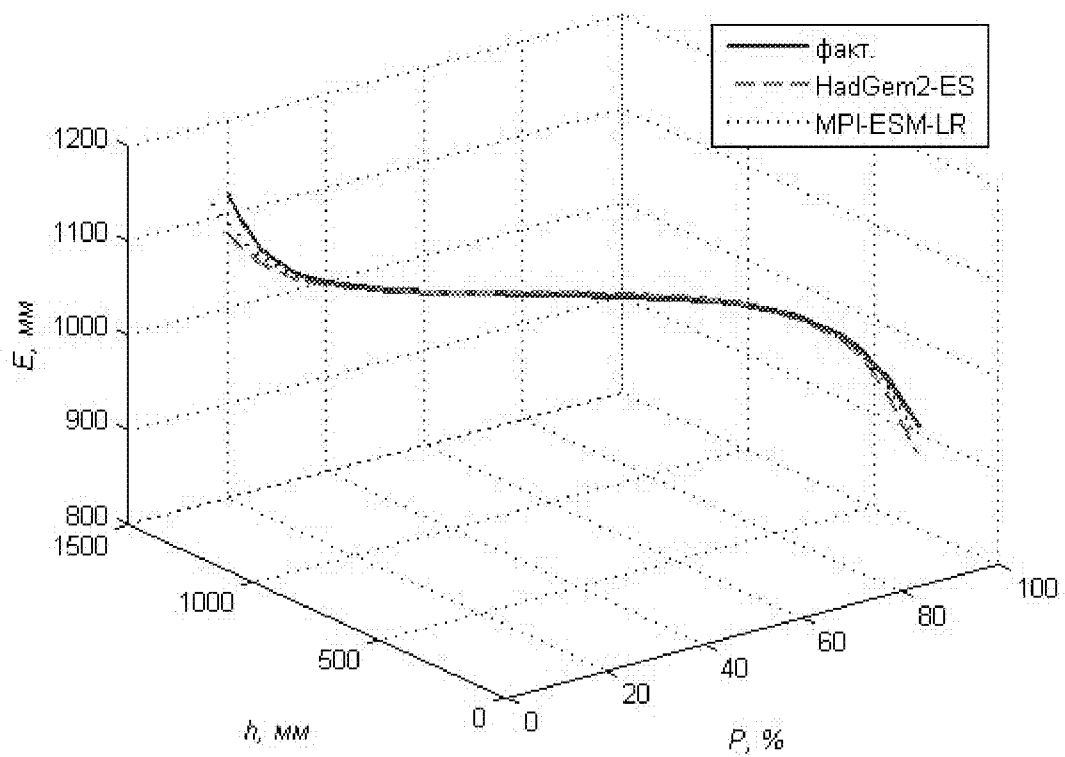
x)

1338271



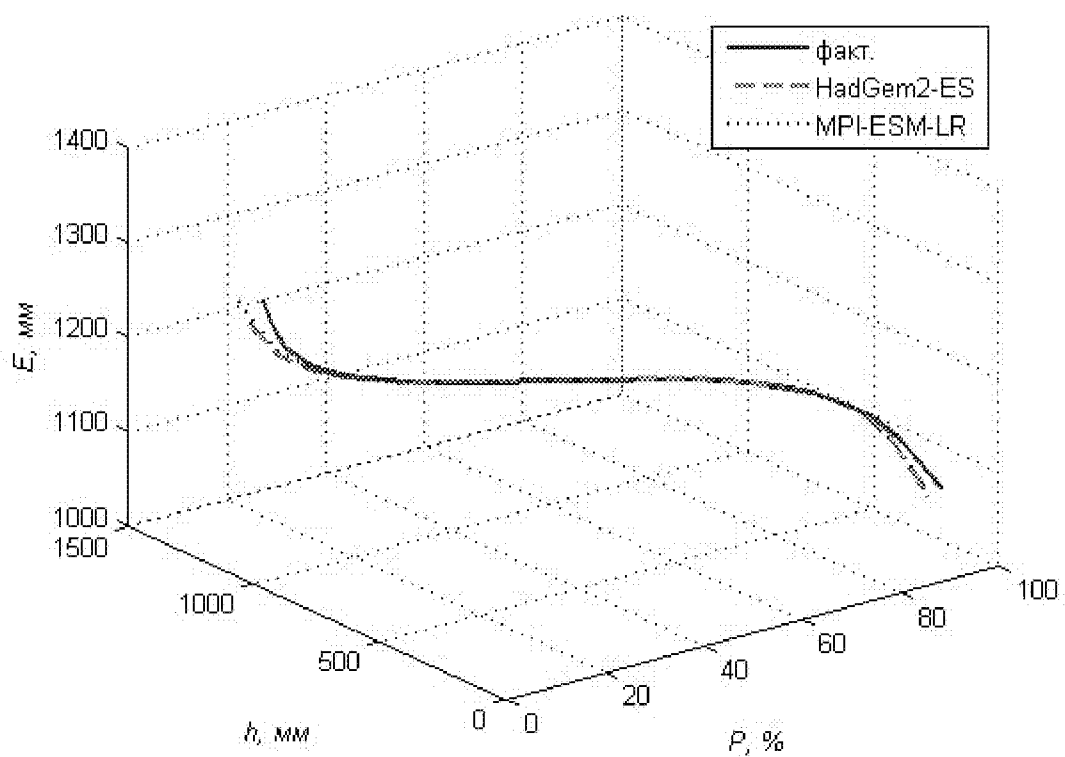
у)

1338401



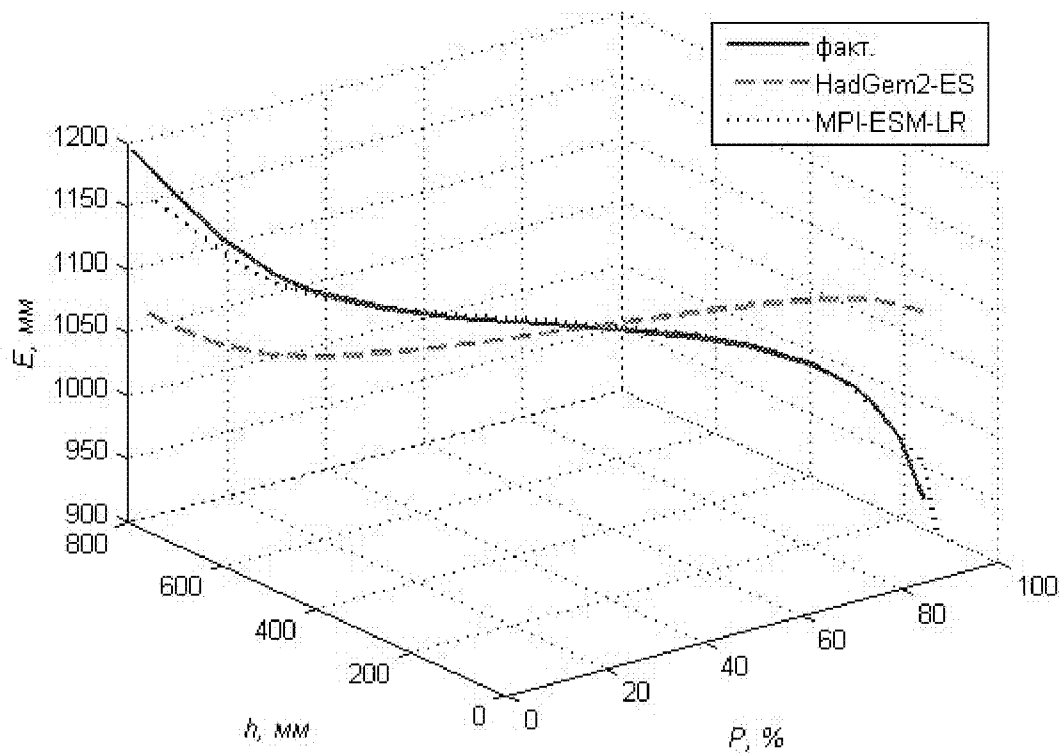
у)

1338200



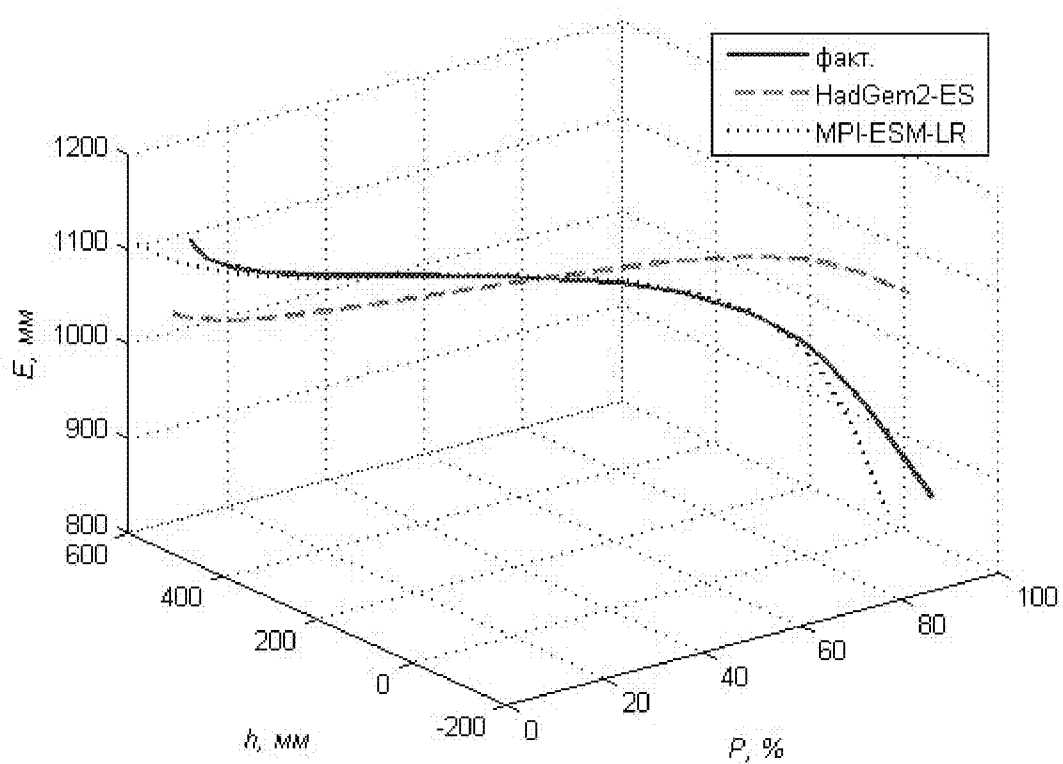
u)

1348100



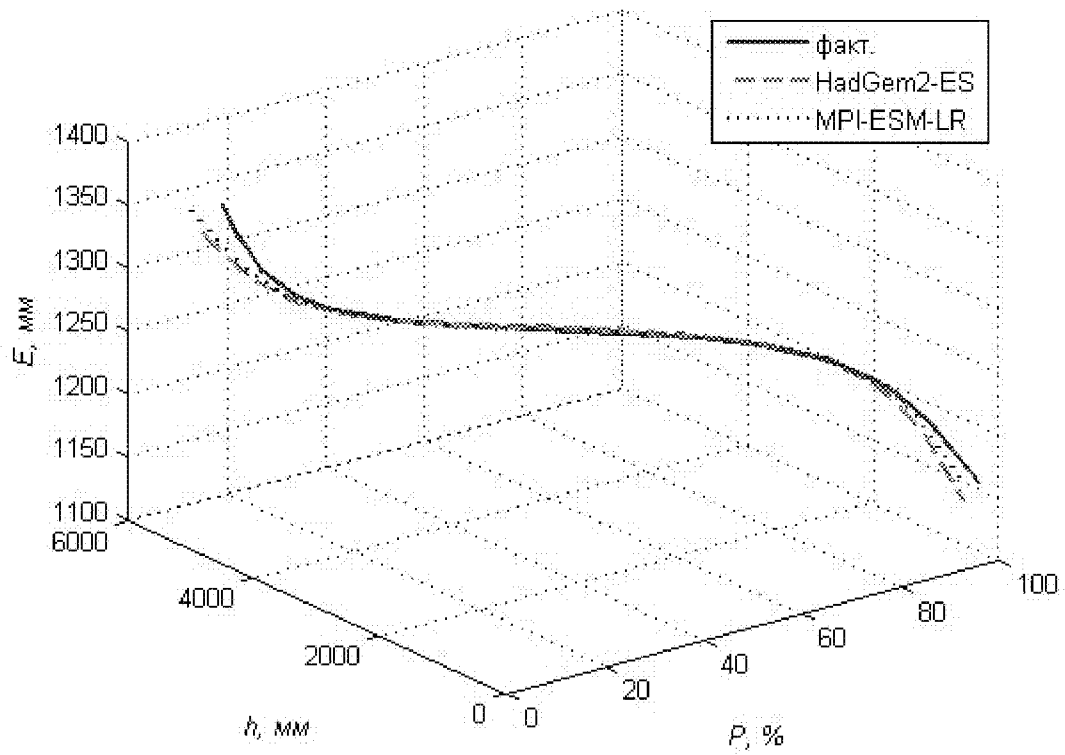
u)

1339012



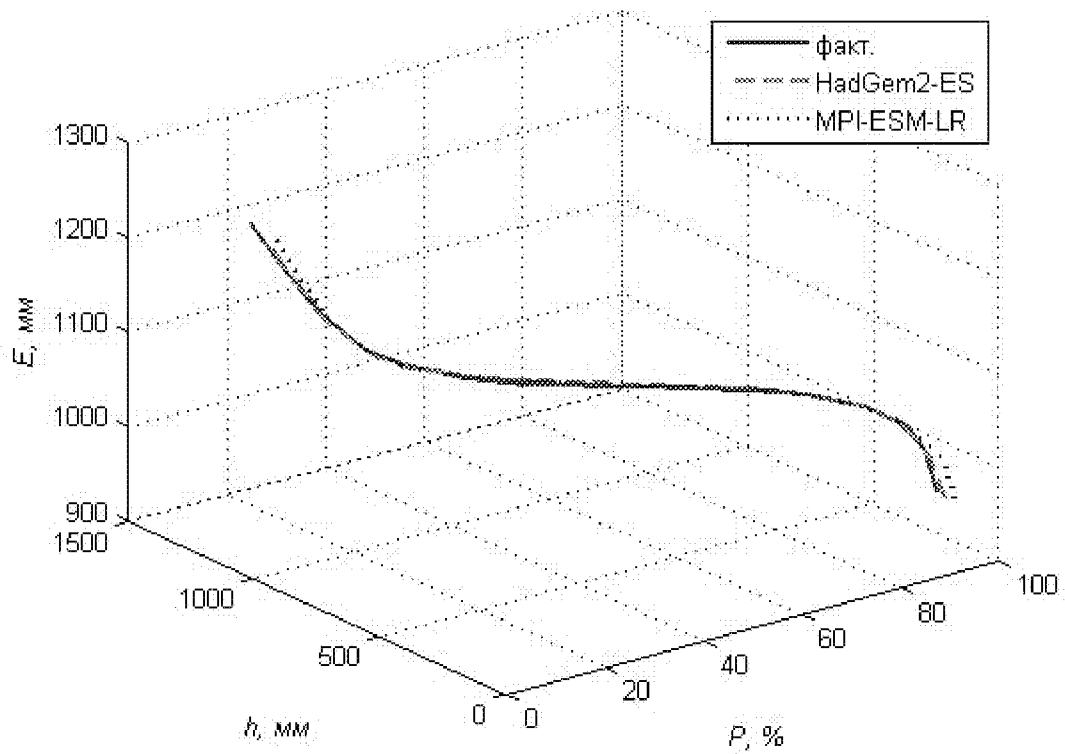
9)

1336500



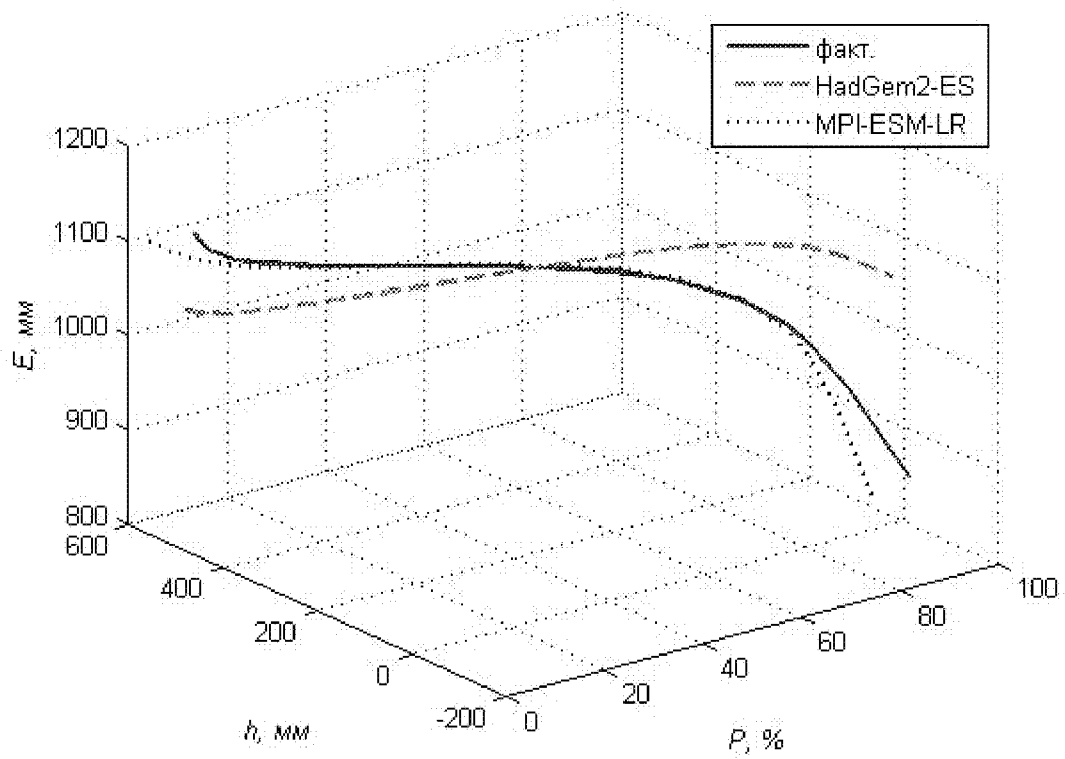
10)

1337200



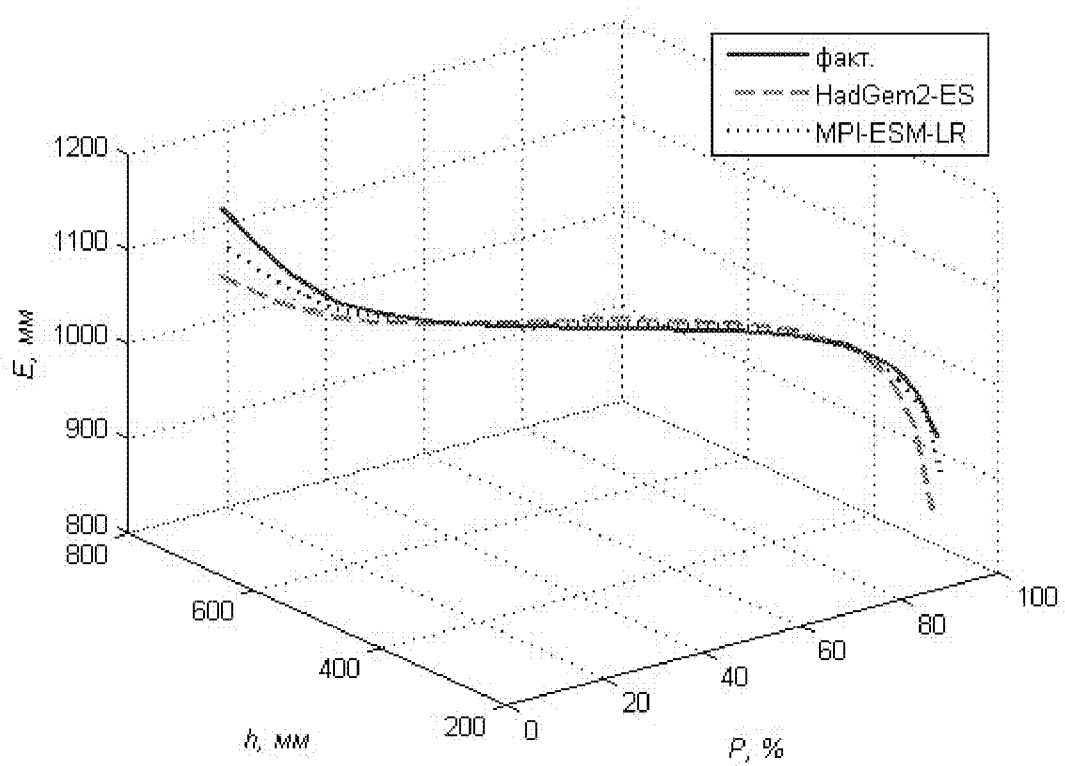
я)

1339011



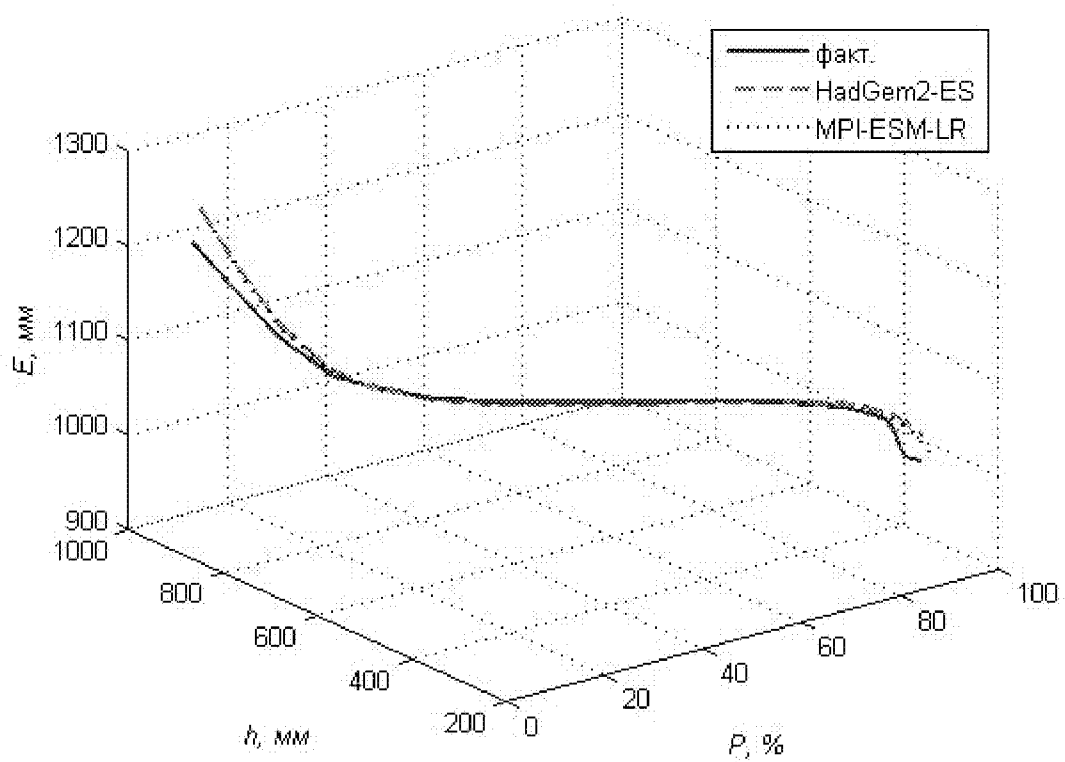
аа)

1348151



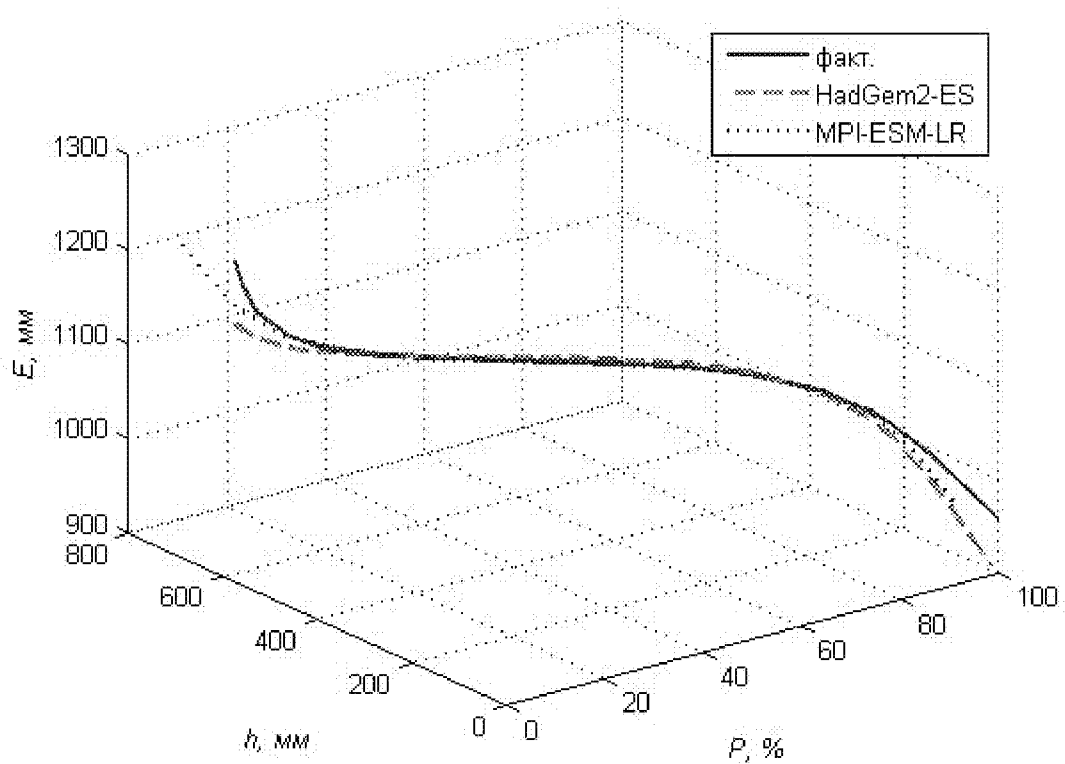
aб)

1338201



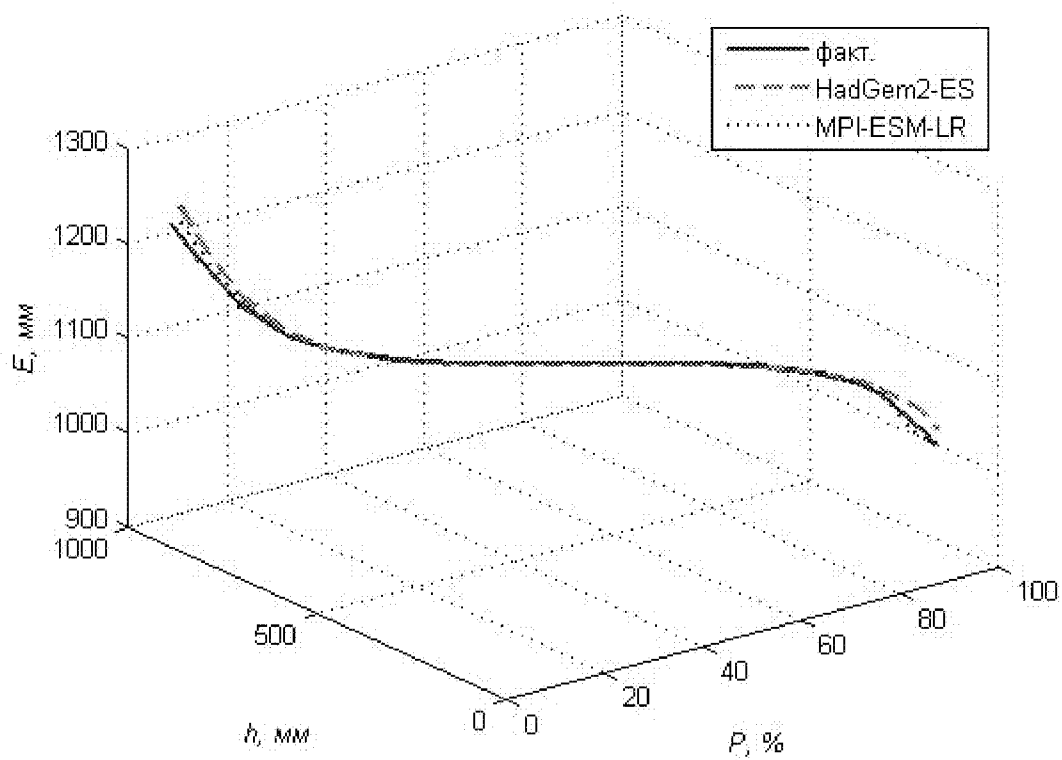
ав)

1339015



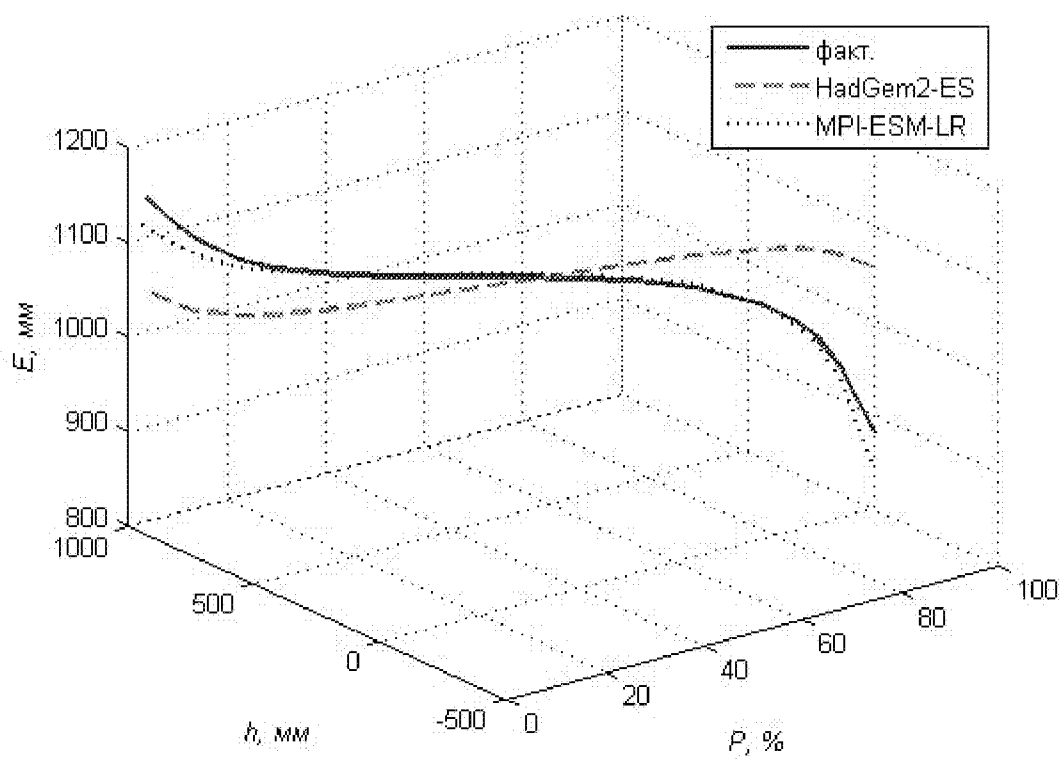
a2)

1340500



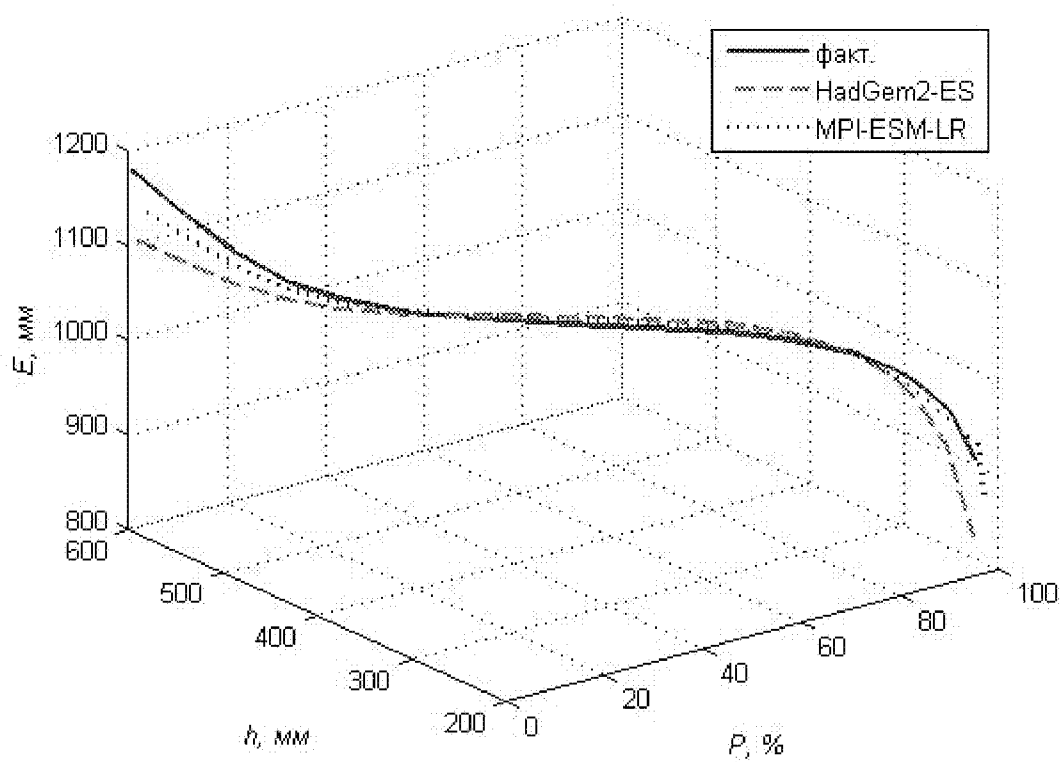
aд)

1339017



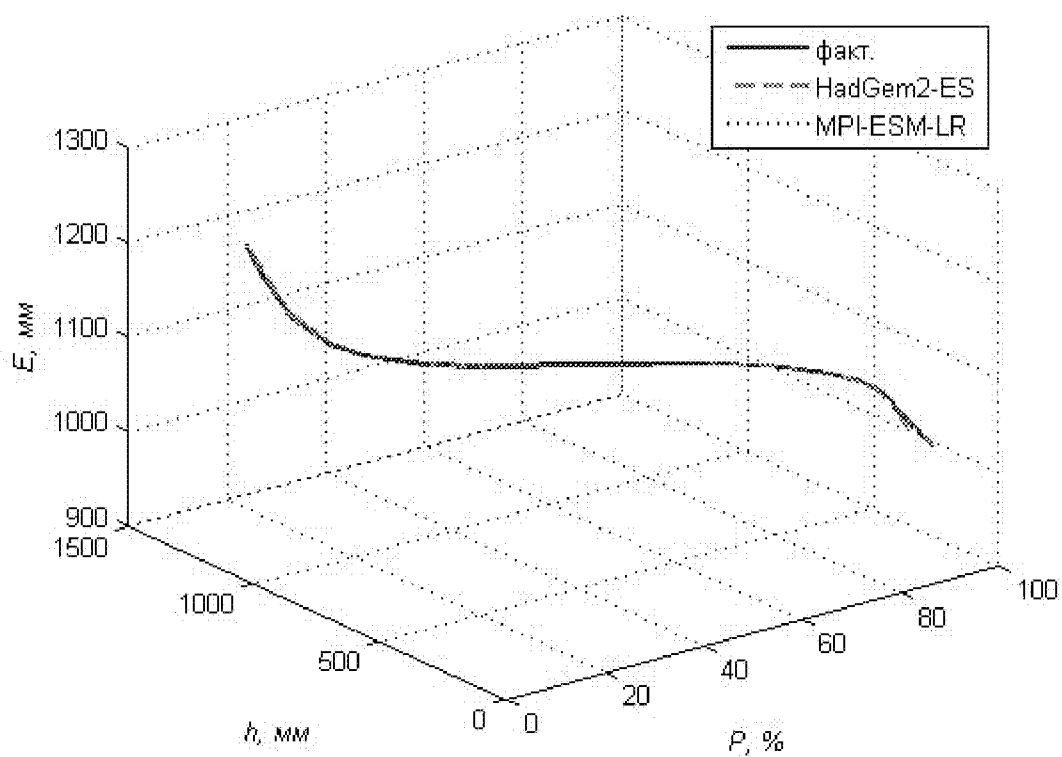
ae)

1348152



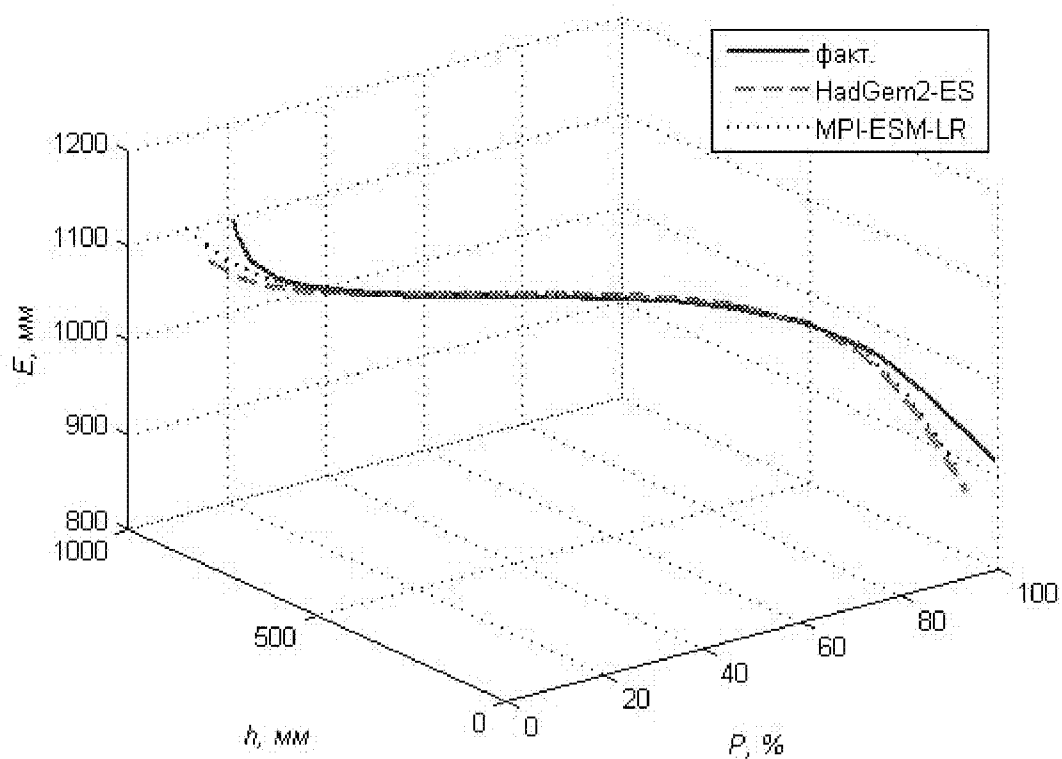
ажс)

1338600



au)

1338300



ак)

1537180

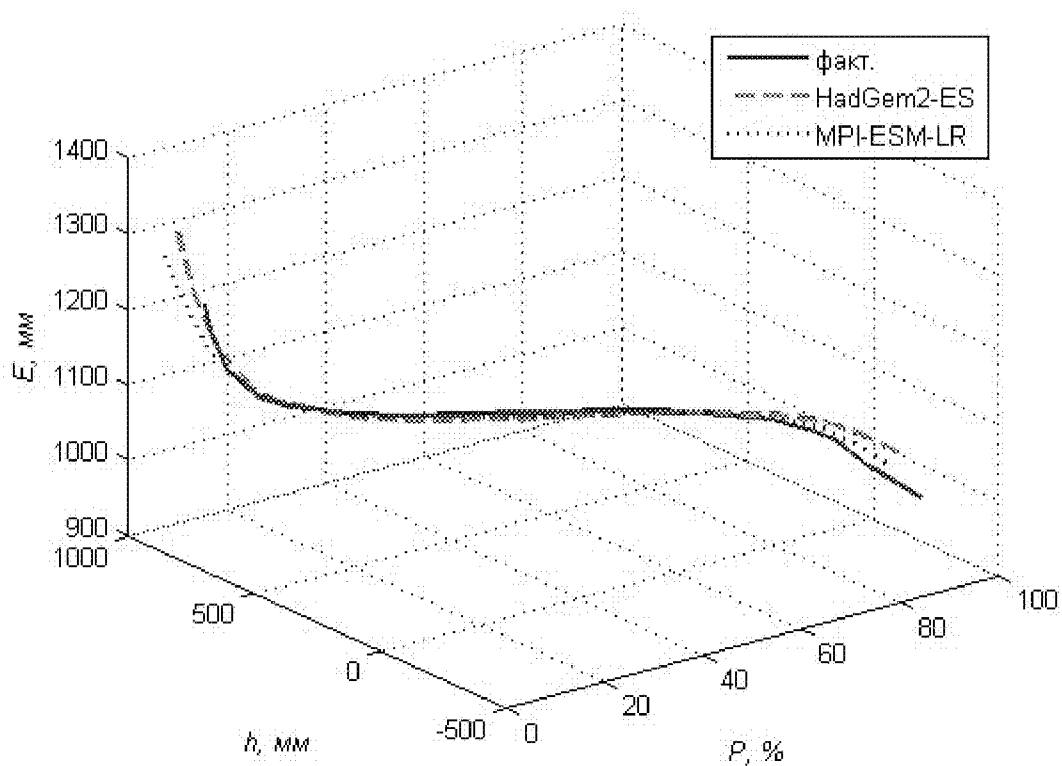
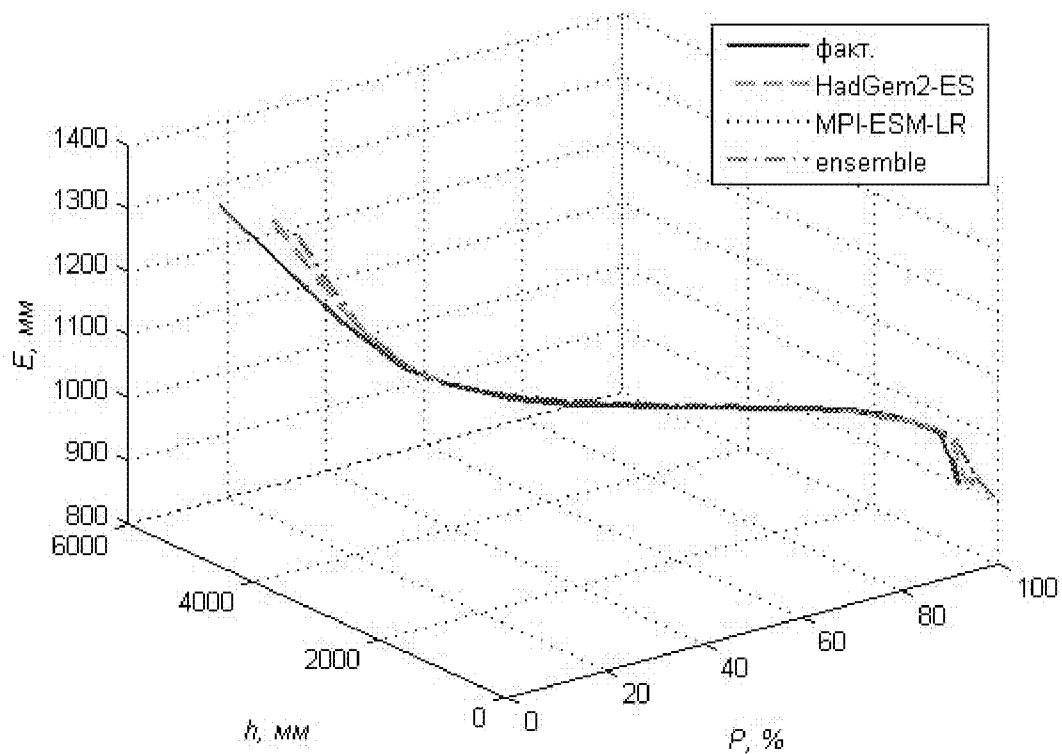


Рисунок Ж.1 – Одномерные многообразия для речных бассейнов Западной Африки.

ПРИЛОЖЕНИЕ И – Прогнозные одномерные многообразия на 2046–2065 гг.

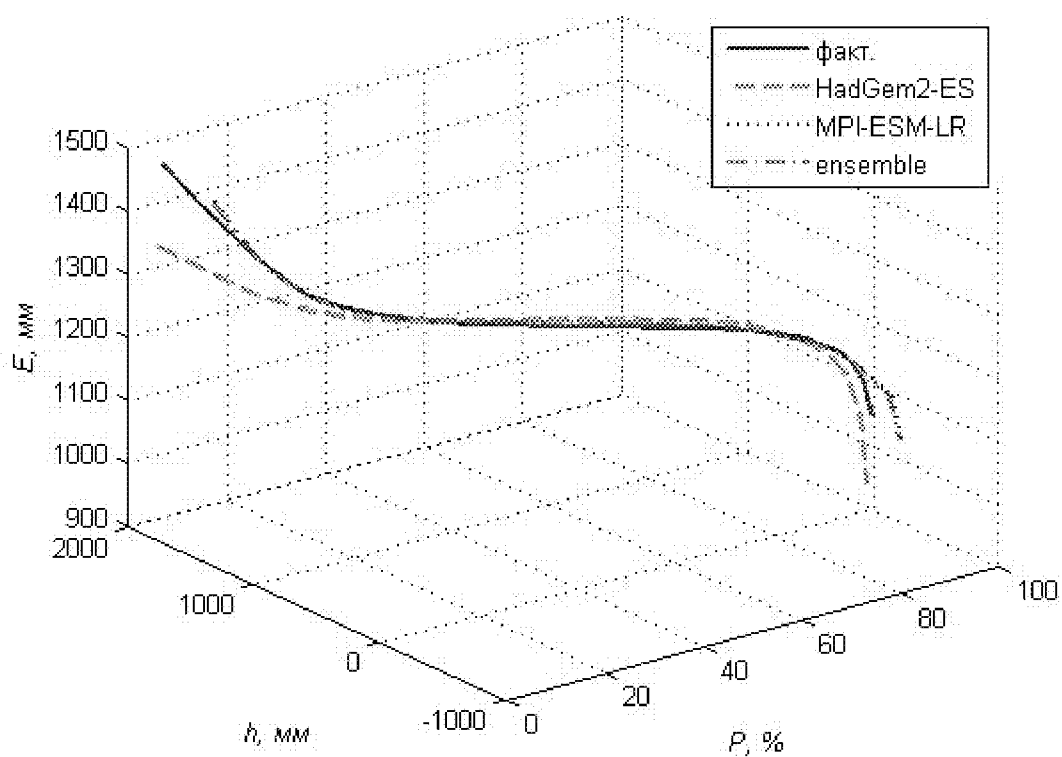
a)

1634550



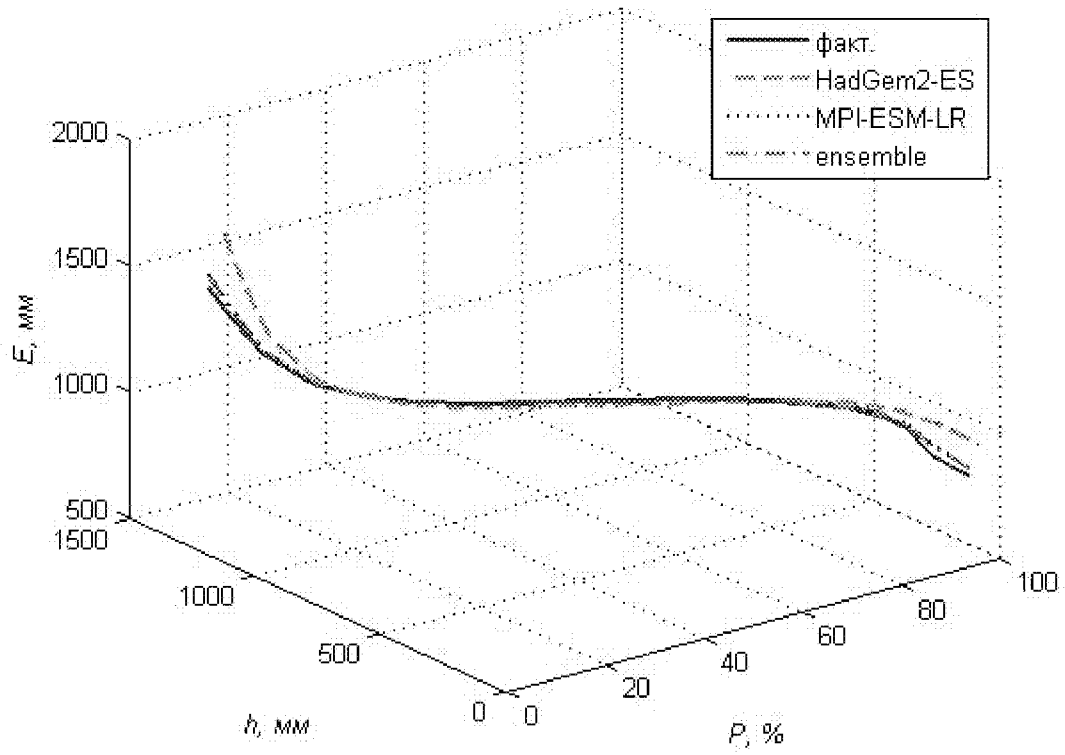
б)

1634100



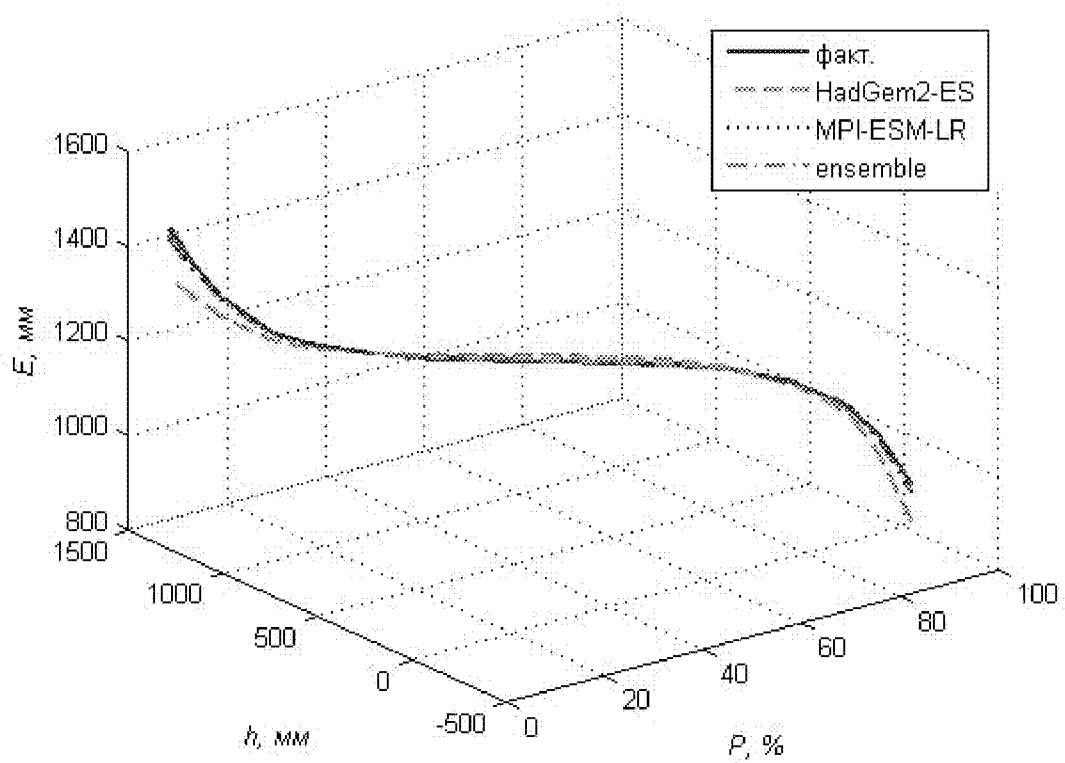
e)

1634500



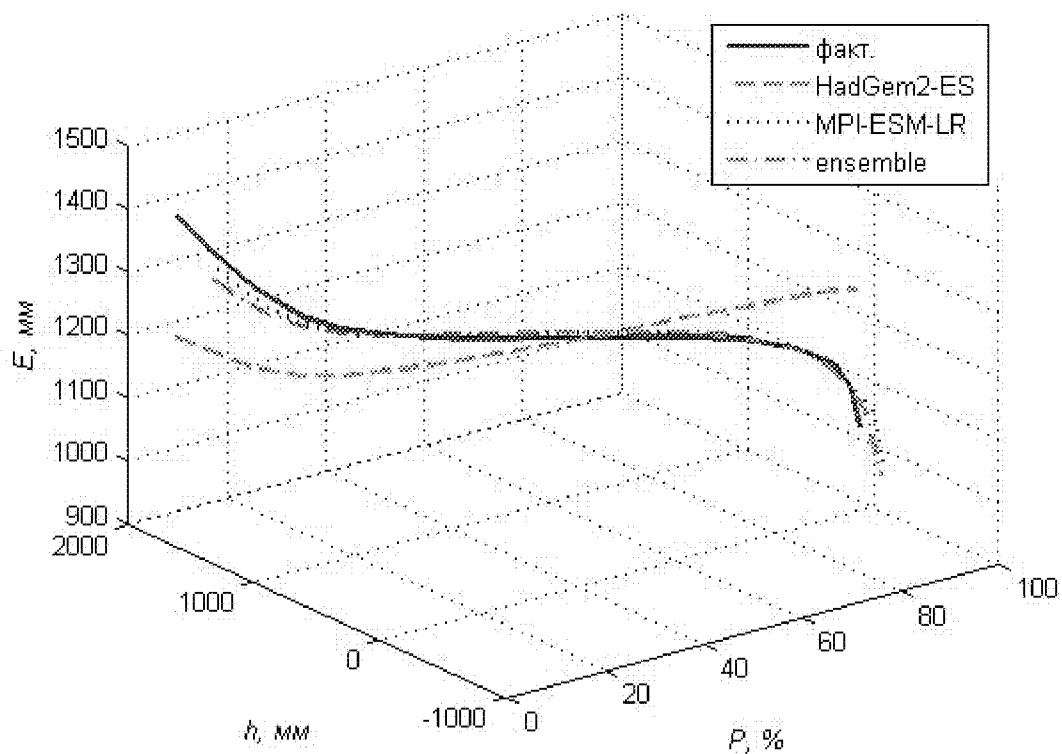
з)

1634420



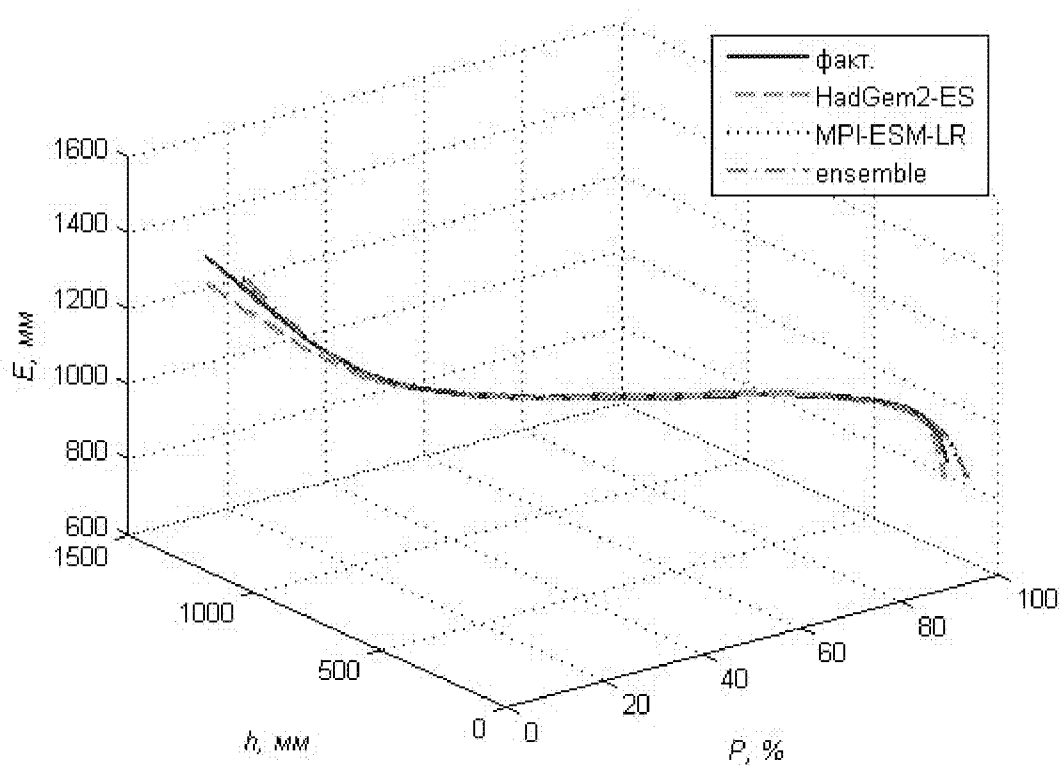
d)

1634400



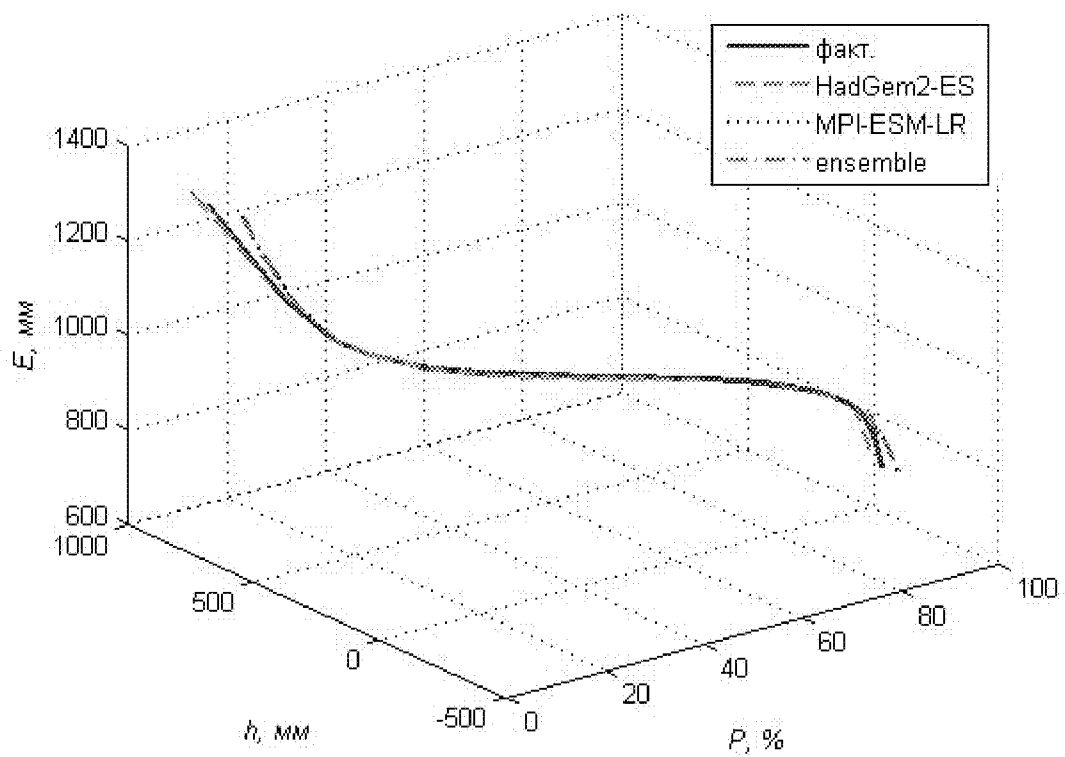
e)

1634800



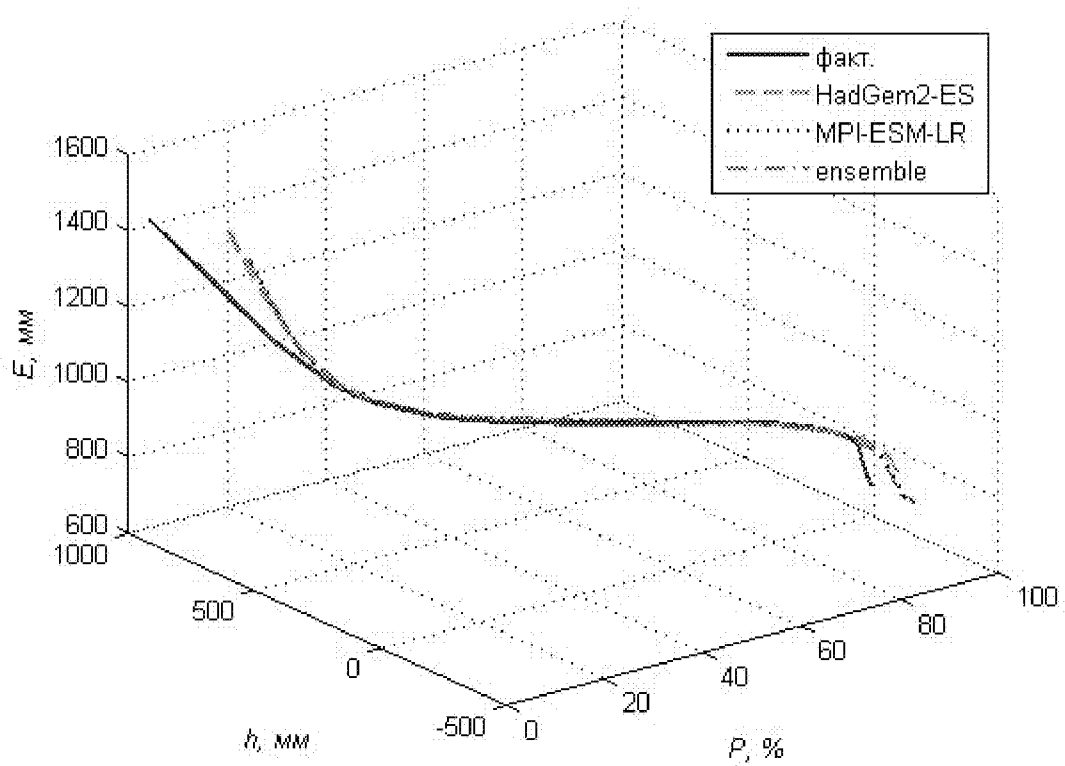
oic)

1734480



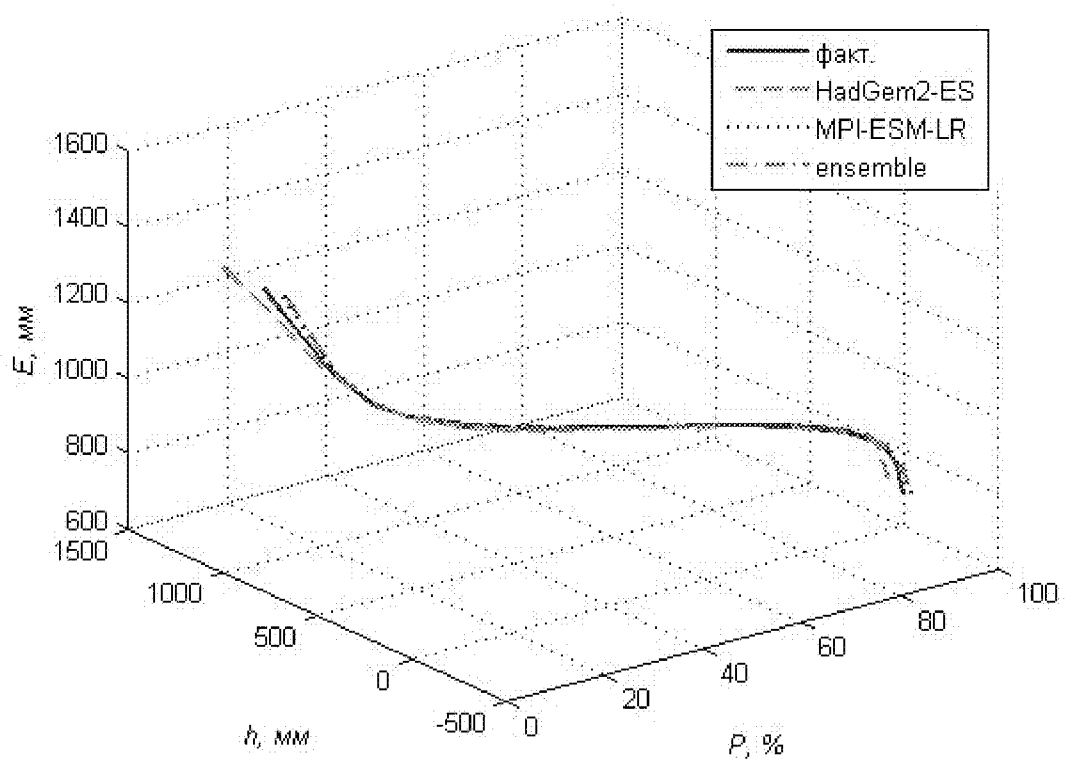
u)

1726100



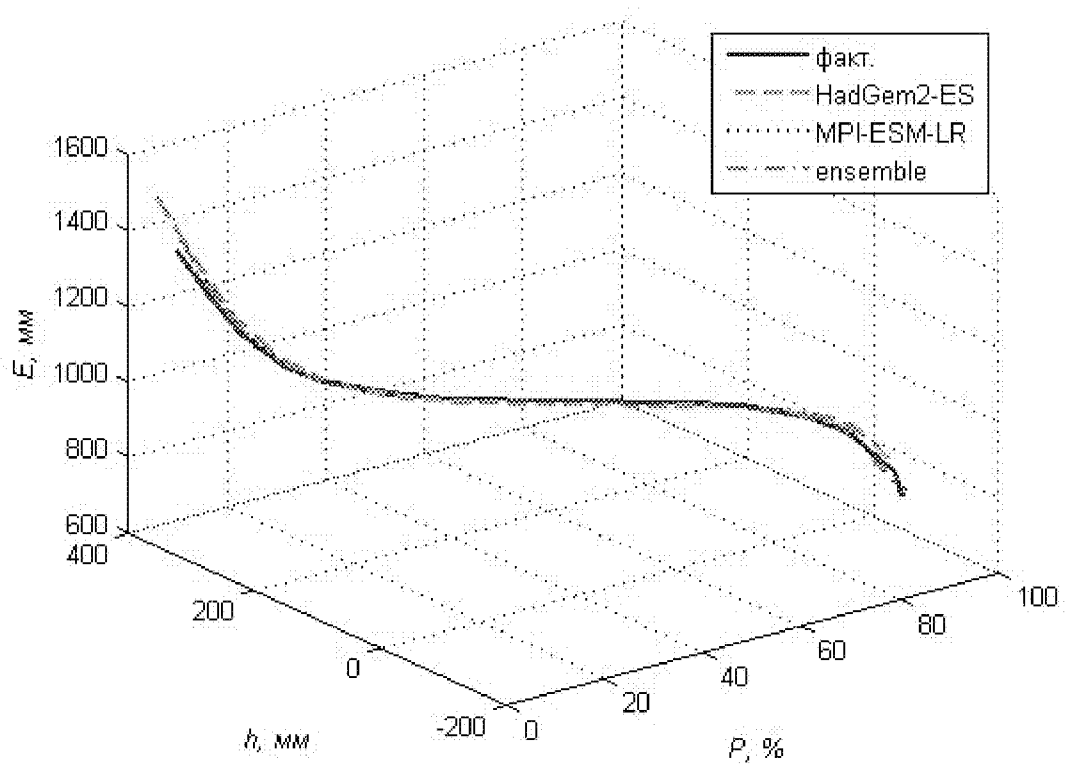
κ)

1734400



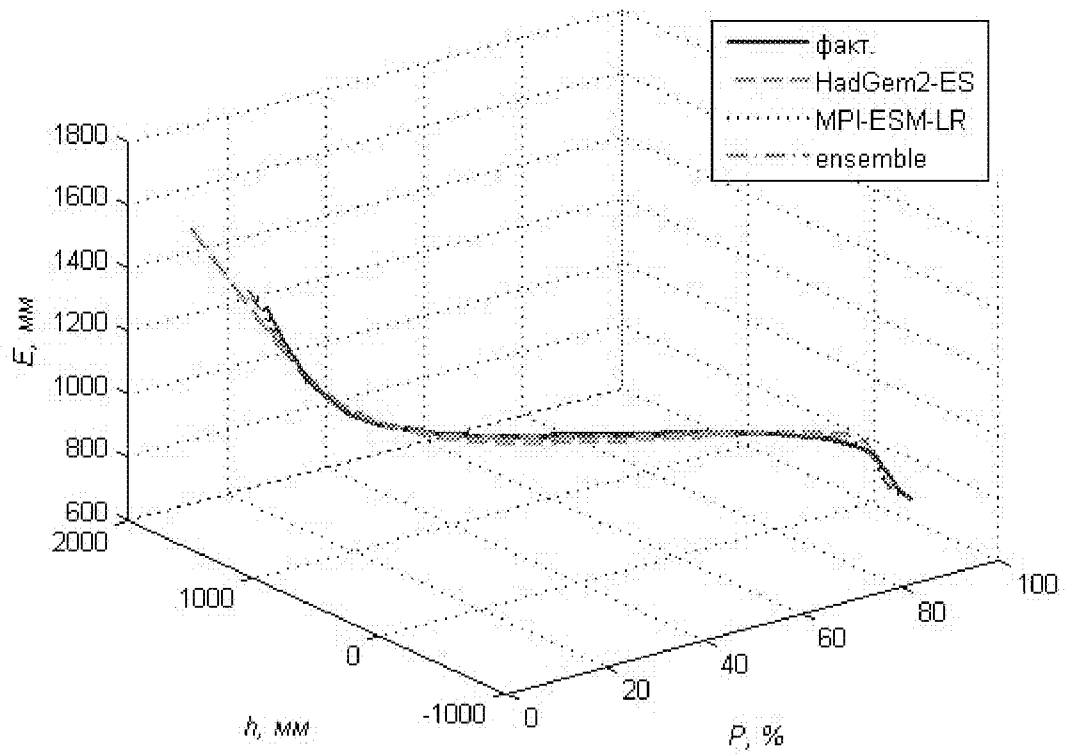
л)

1734410



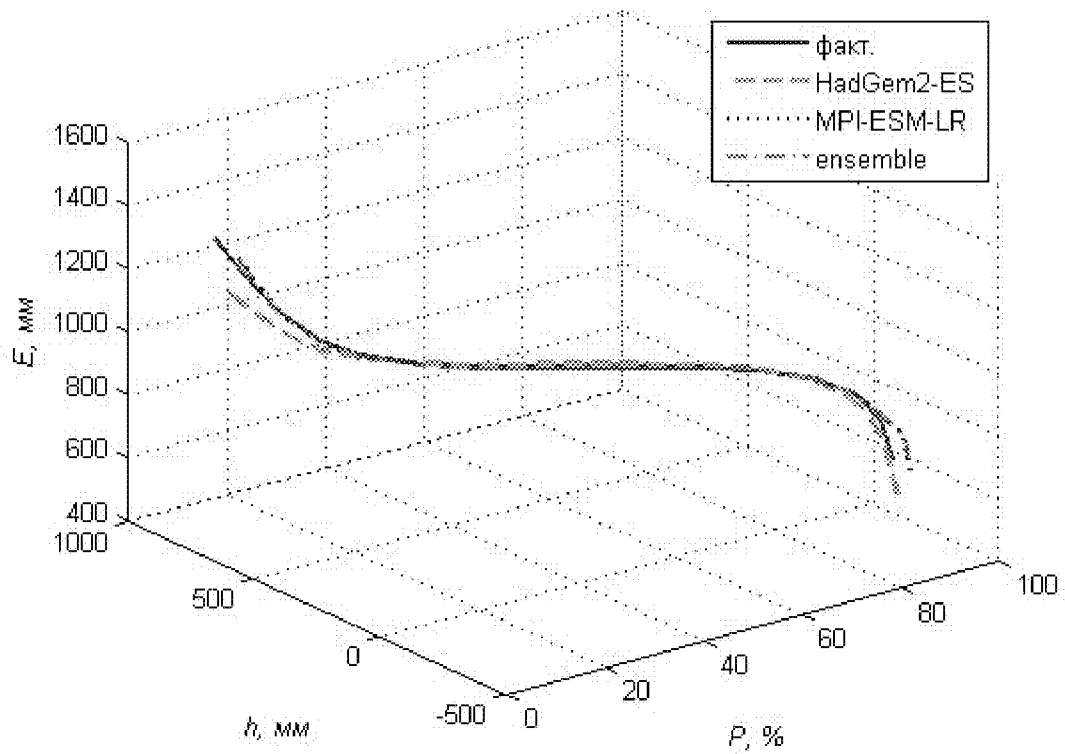
м)

1732100



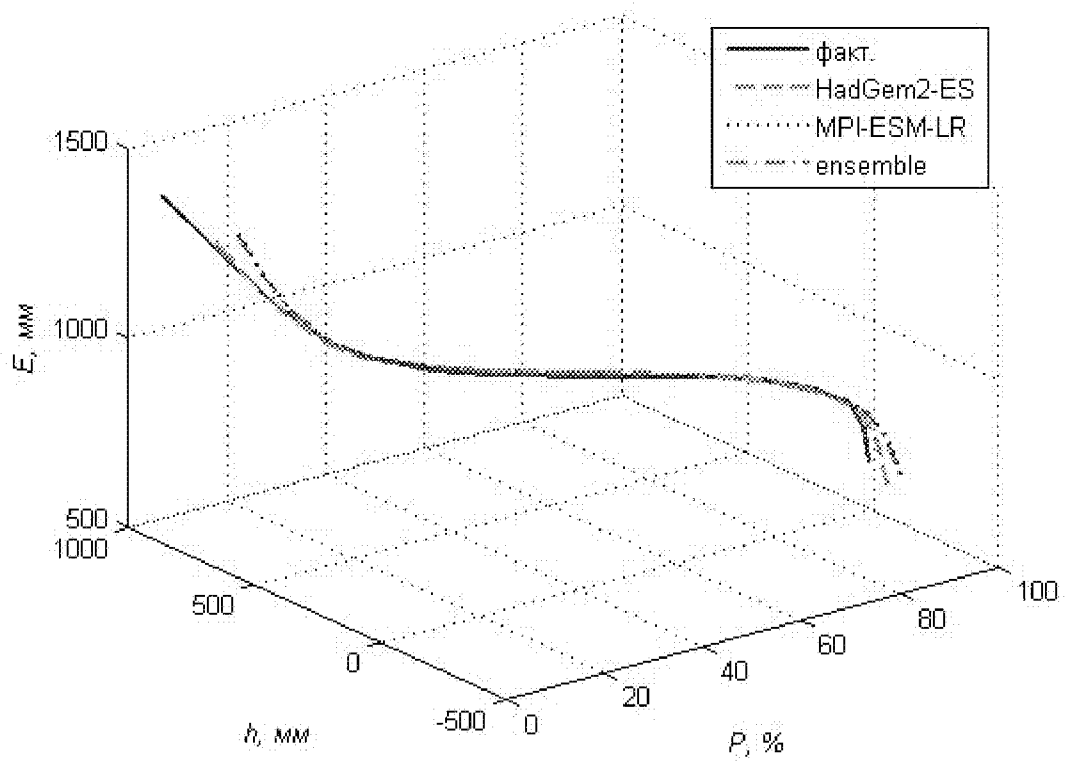
н)

1733300



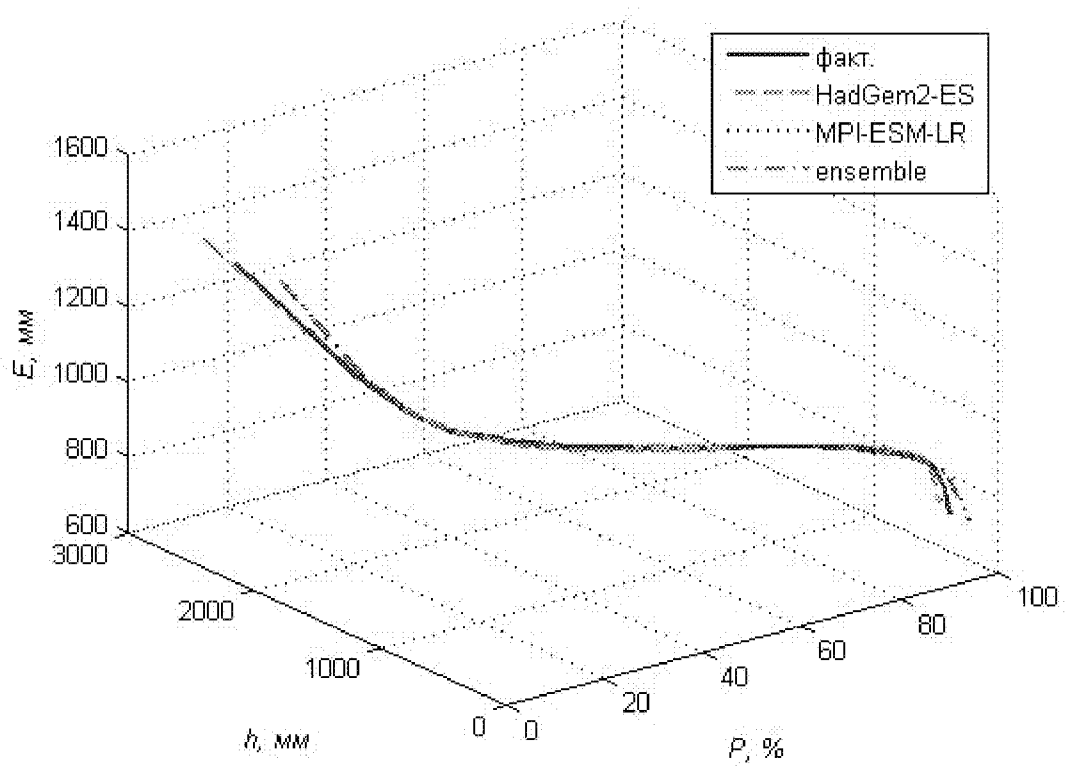
o)

1733600



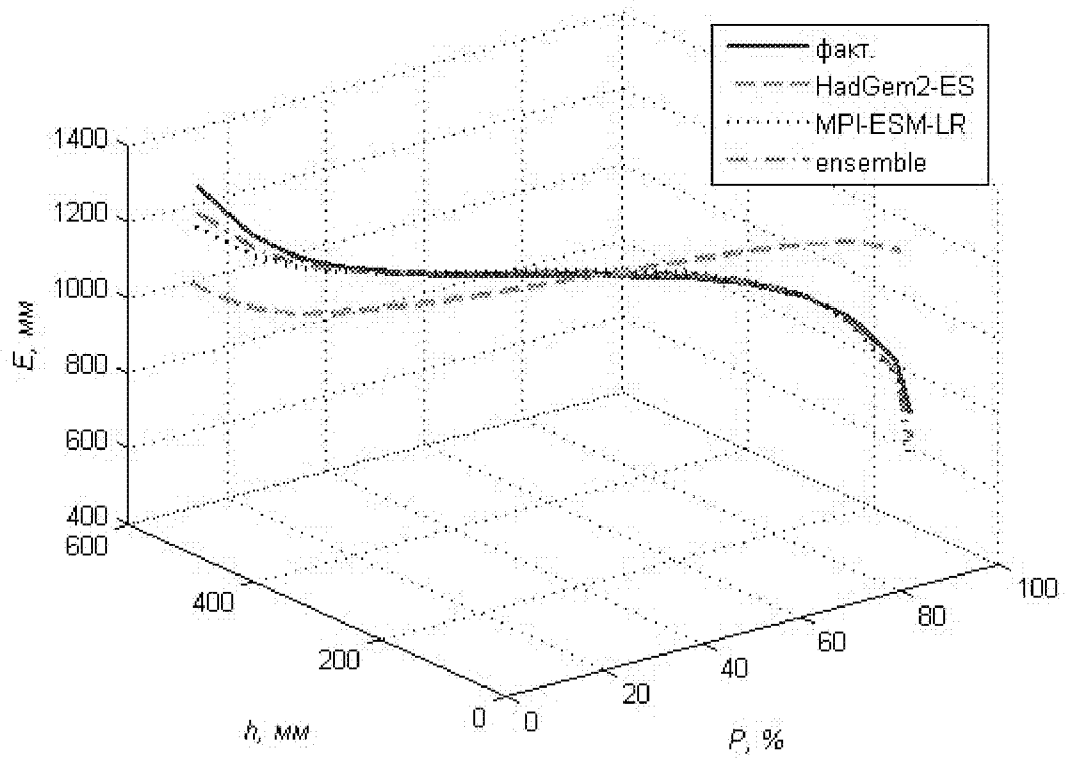
n)

1434780



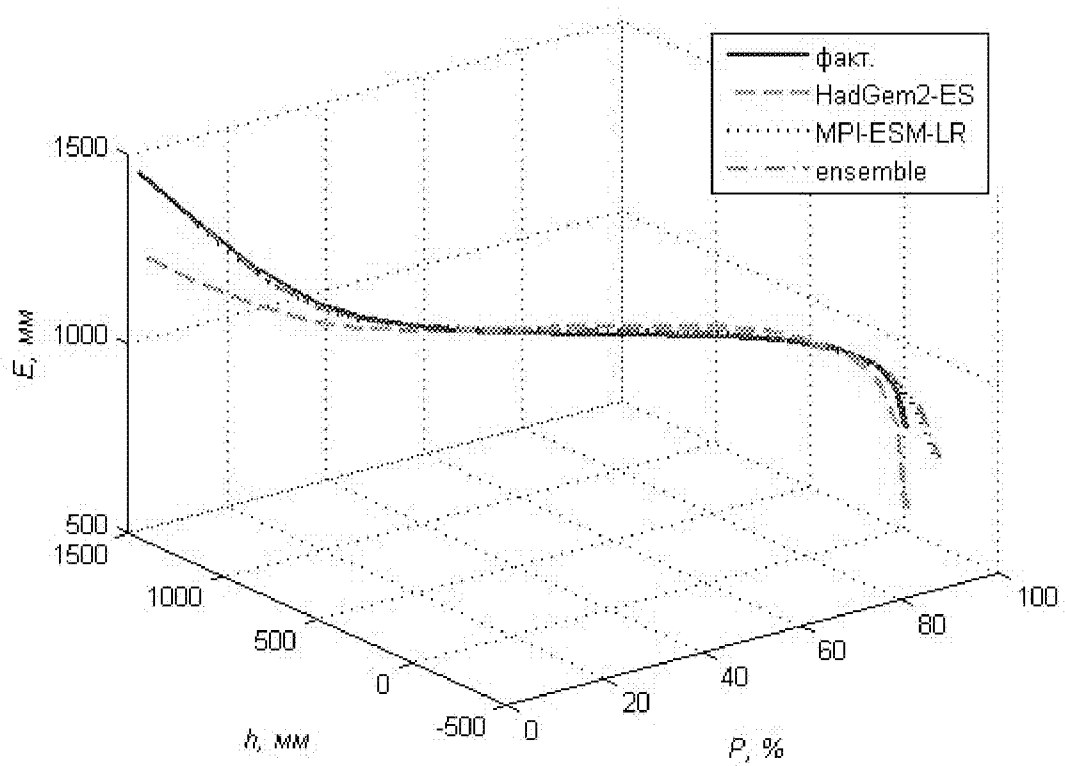
p)

1530100



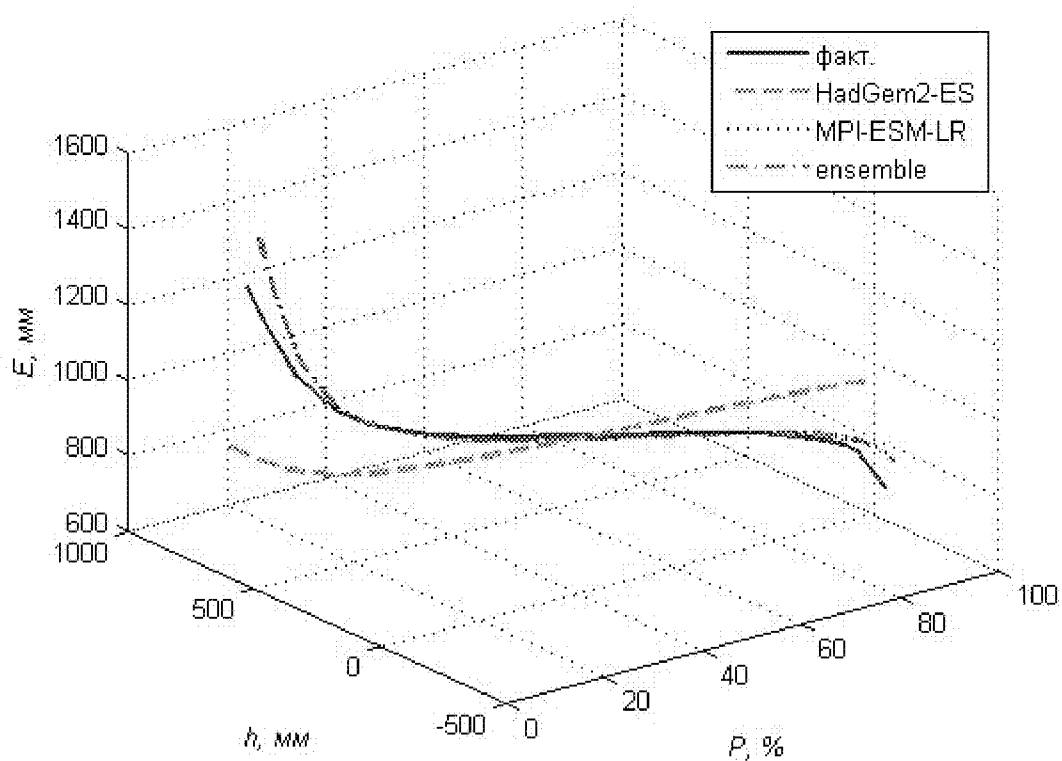
c)

1134040



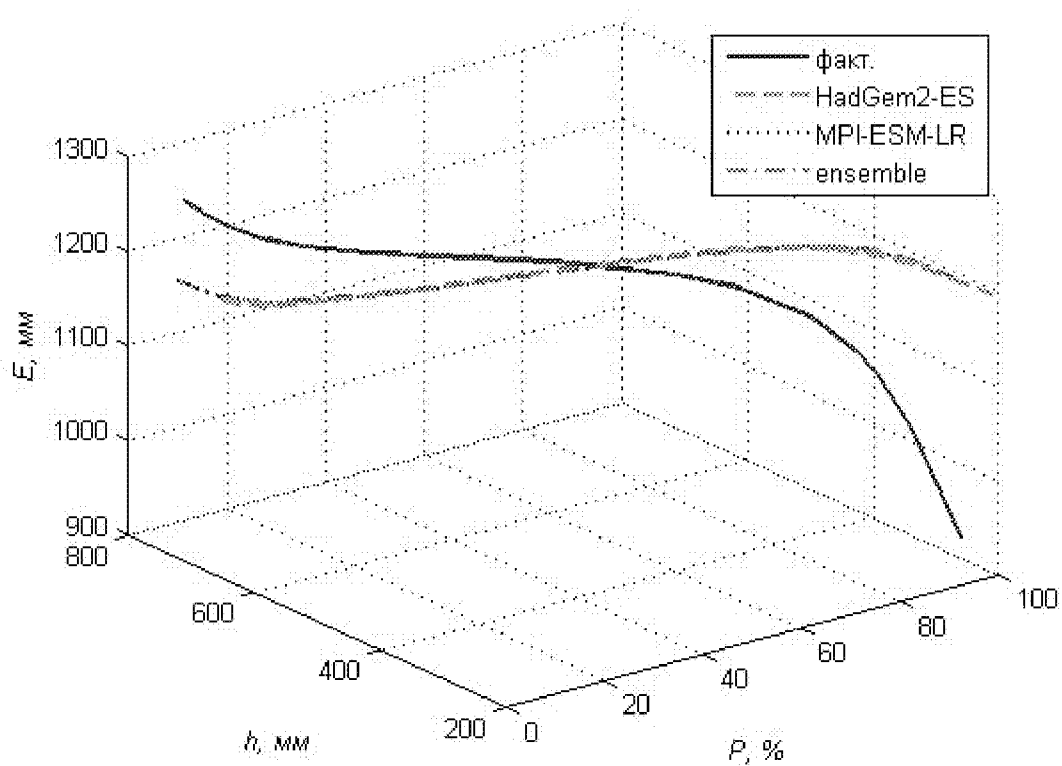
m)

1928745



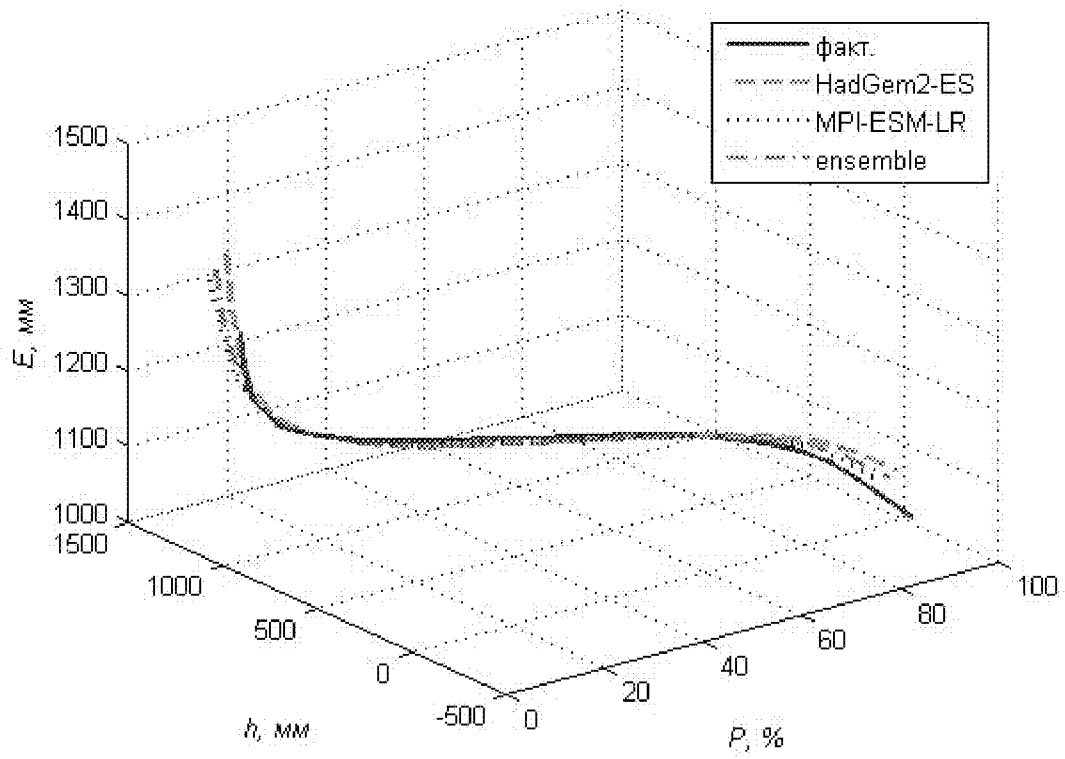
y)

1337151



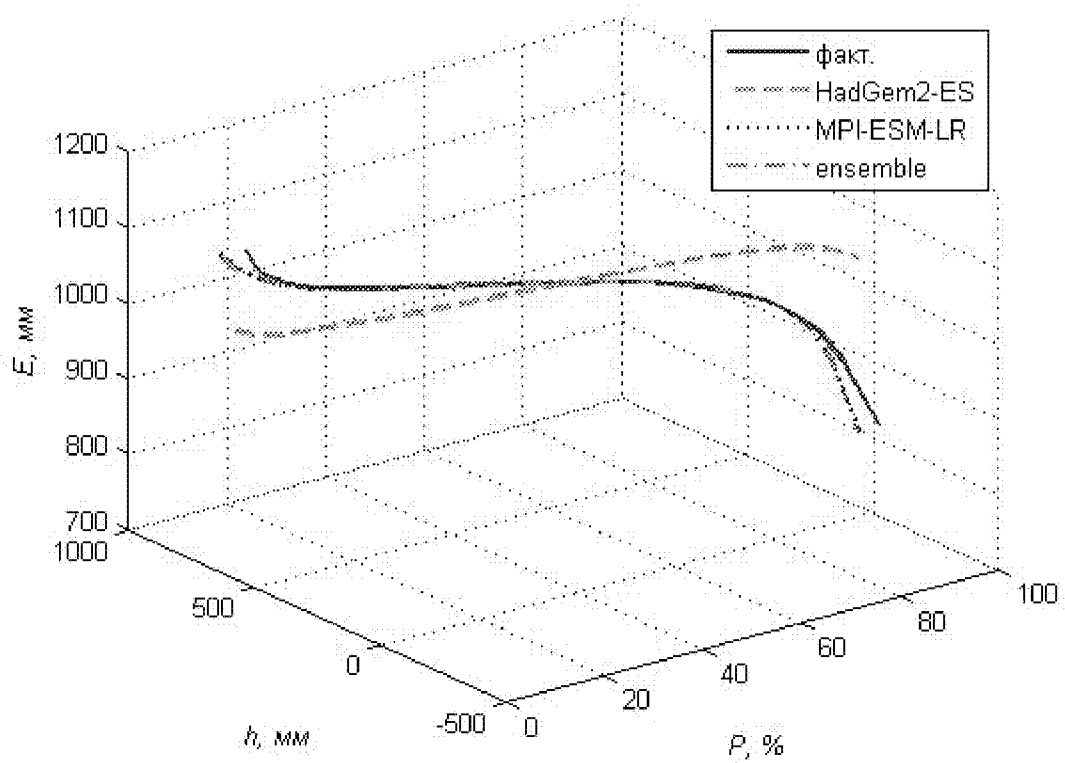
φ)

1337100



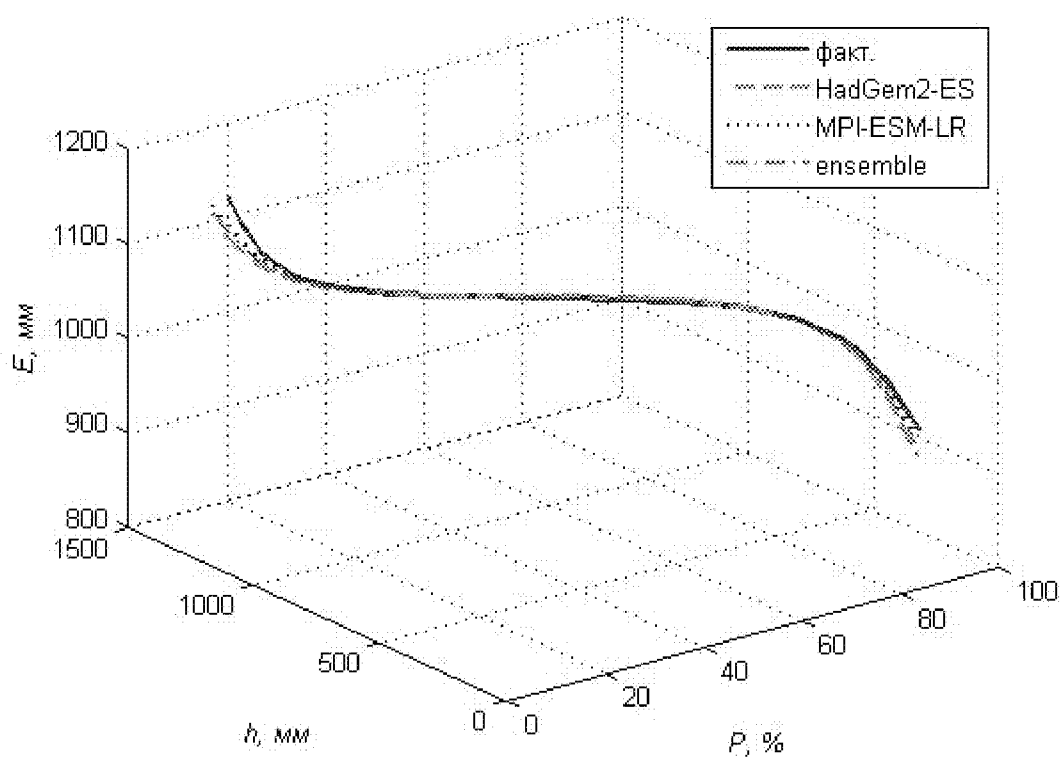
x)

1338271



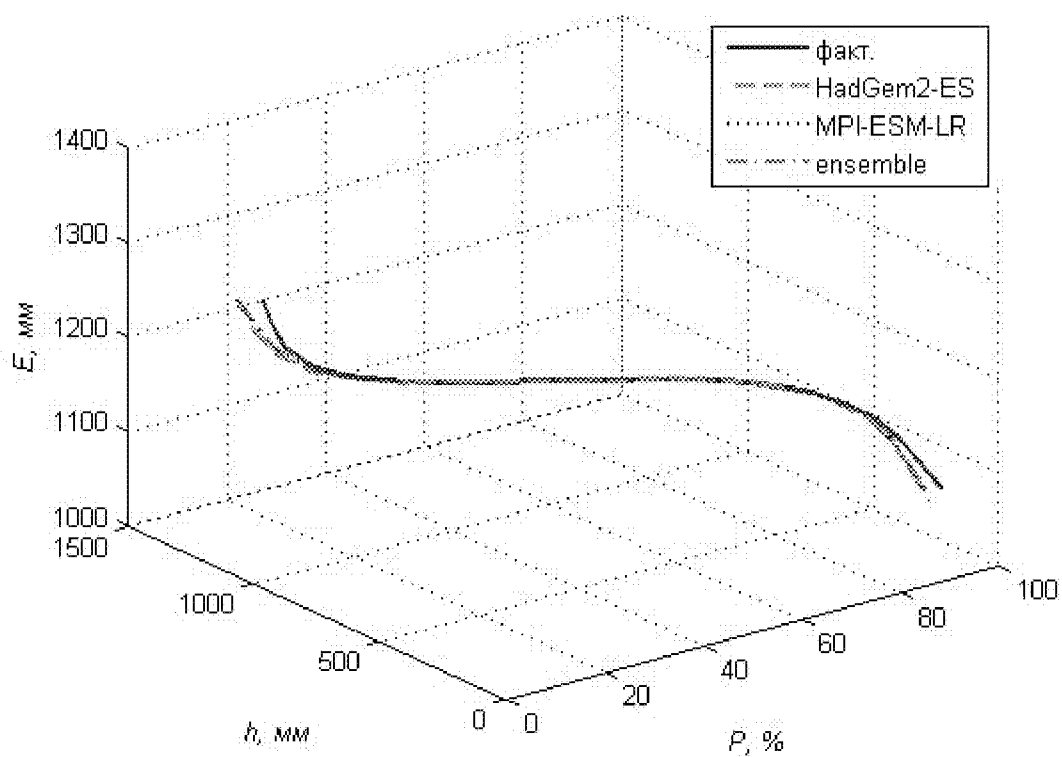
у)

1338401



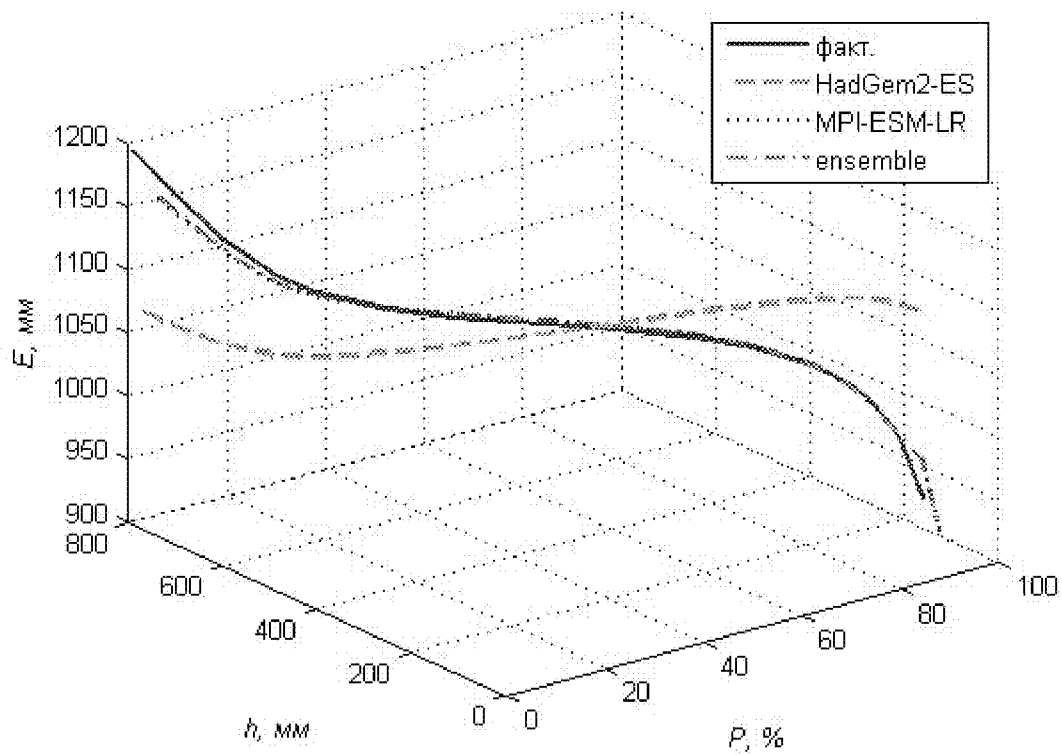
у)

1338200



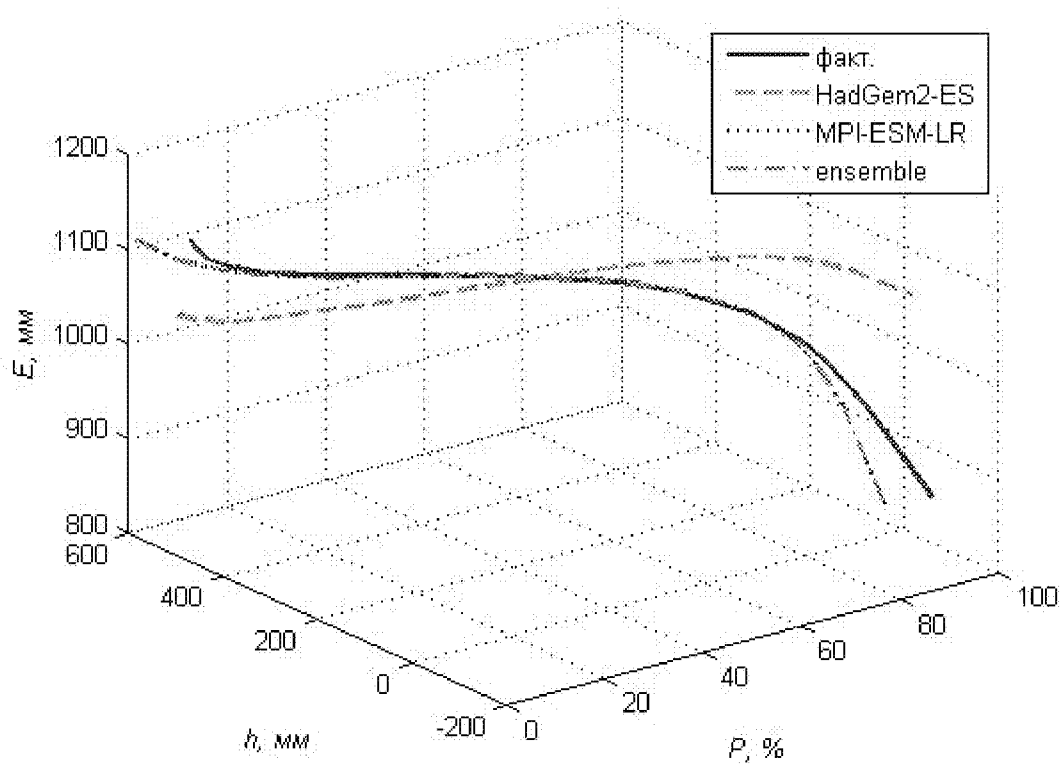
u)

1348100



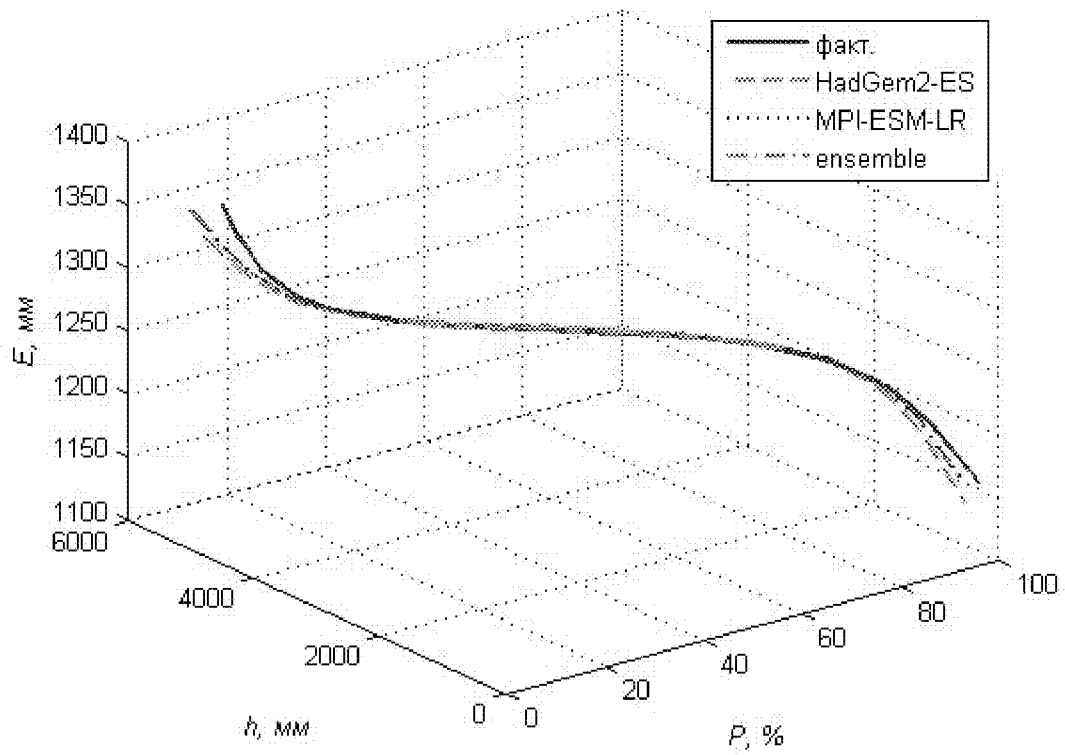
u)

1339012



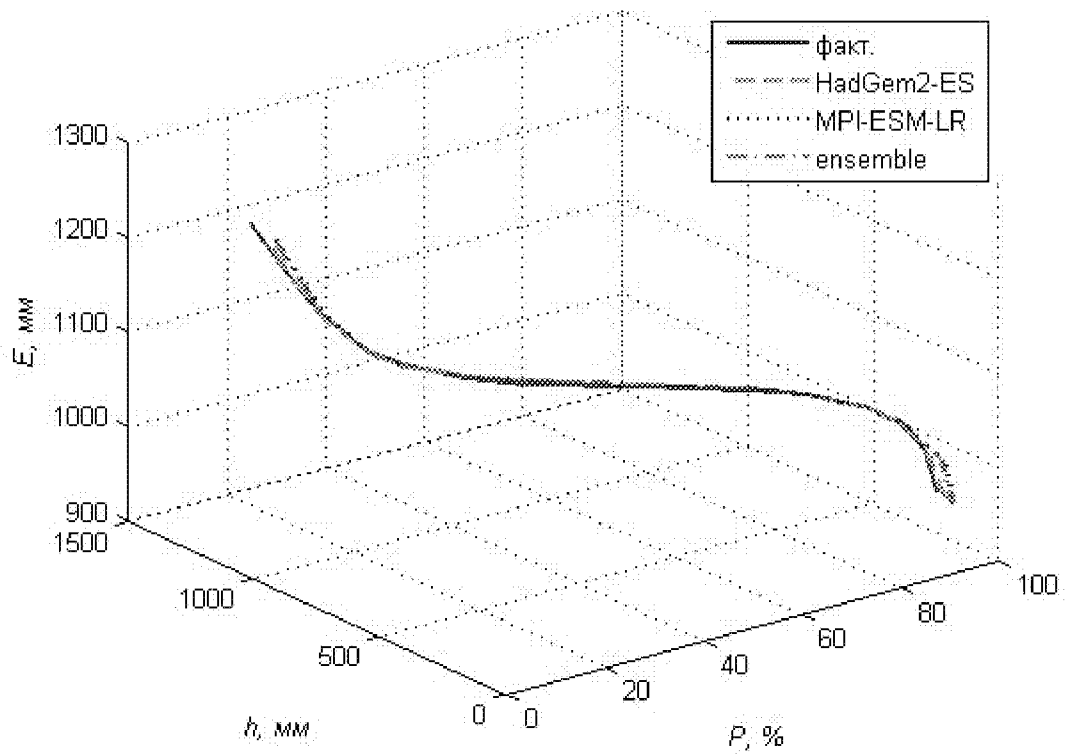
9)

1336500



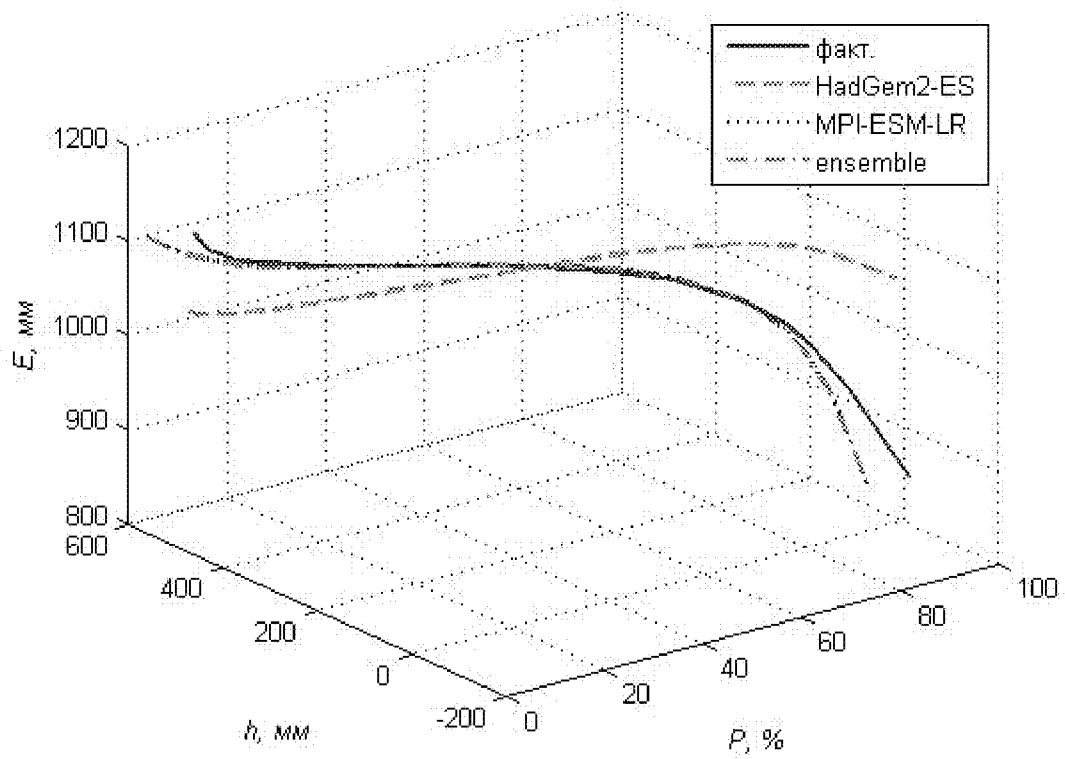
10)

1337200



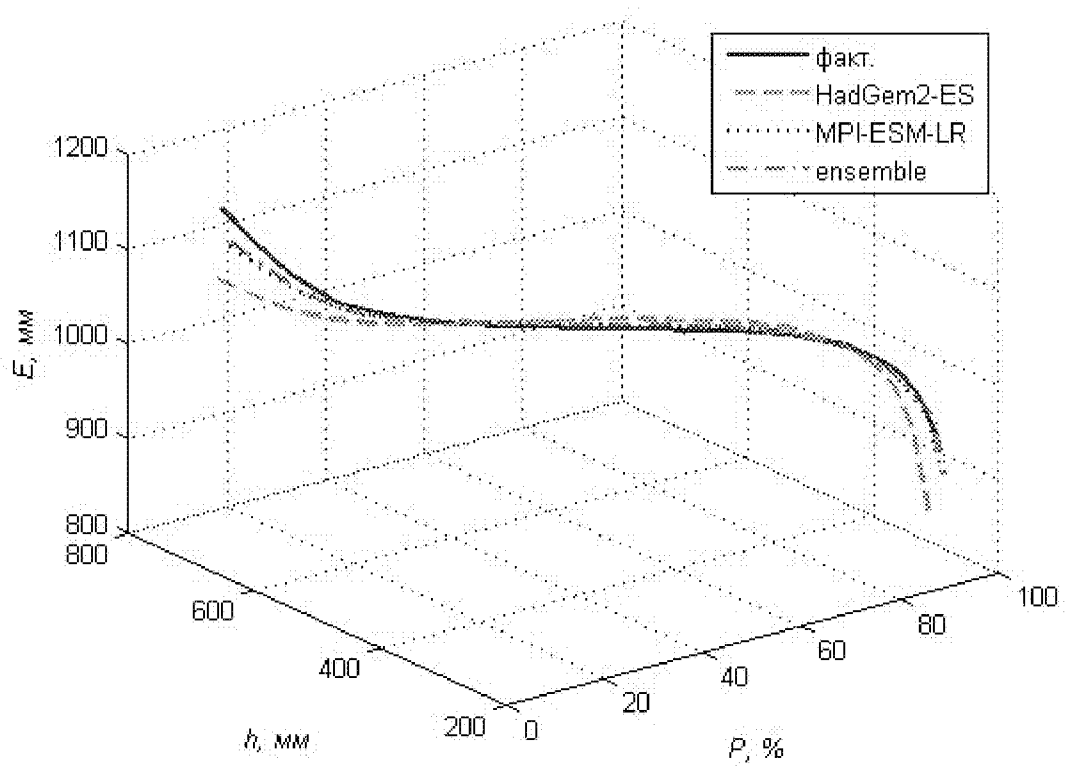
я)

1339011



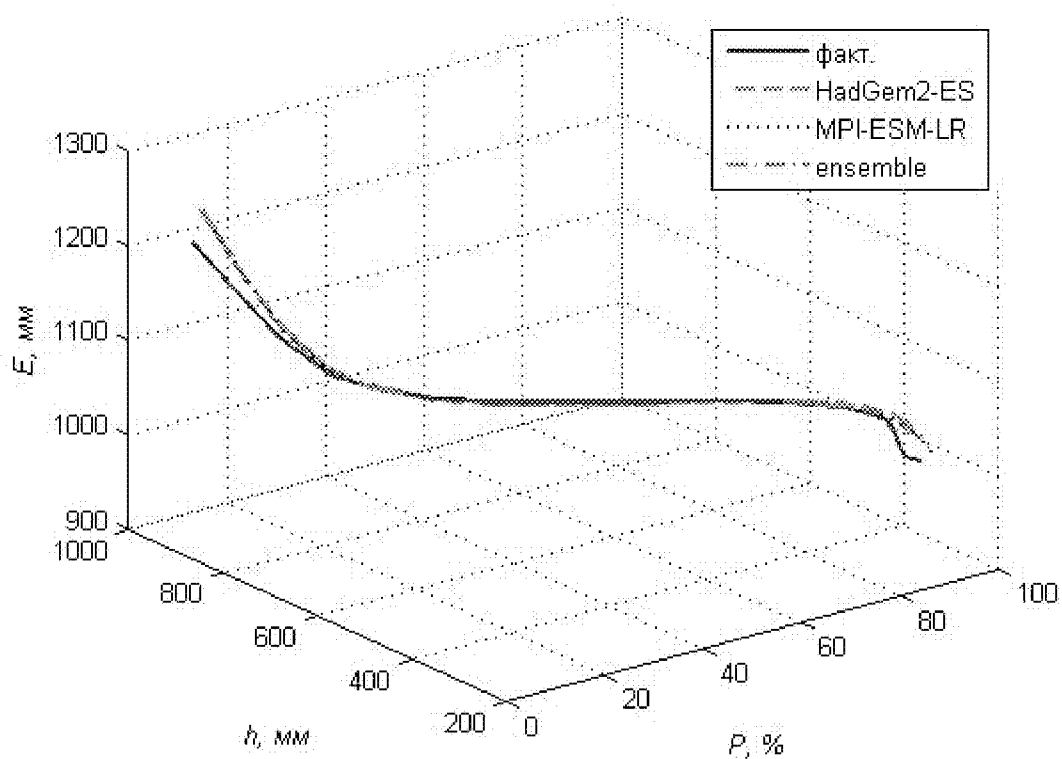
аа)

1348151



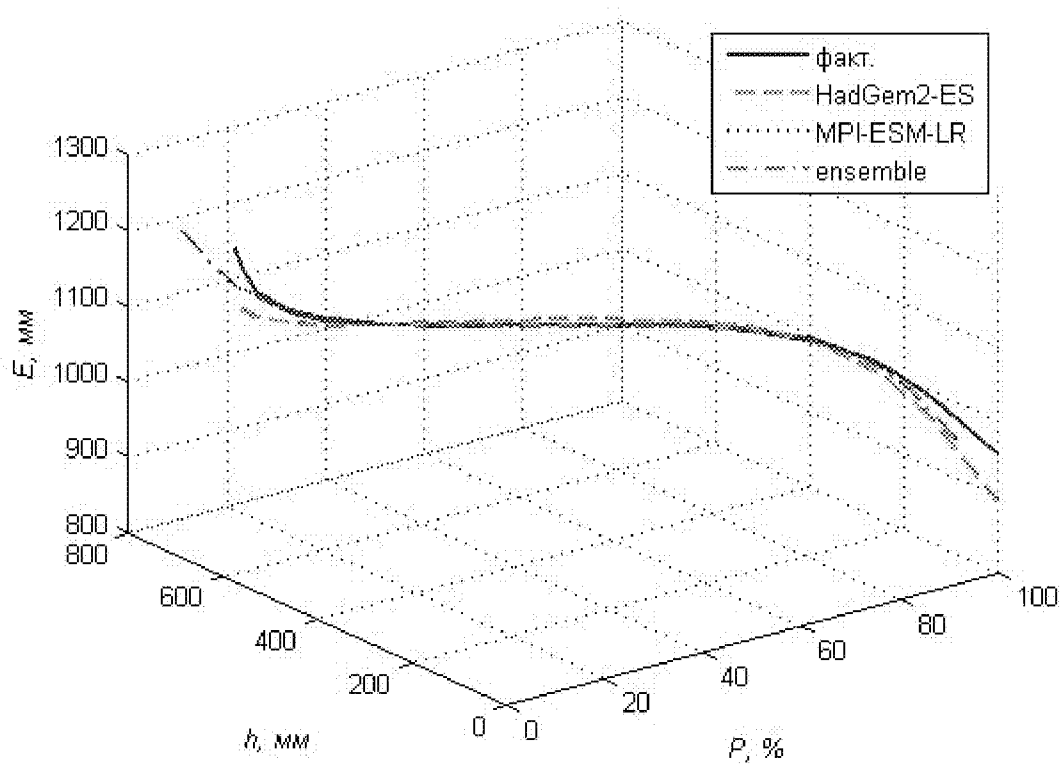
aб)

1338201



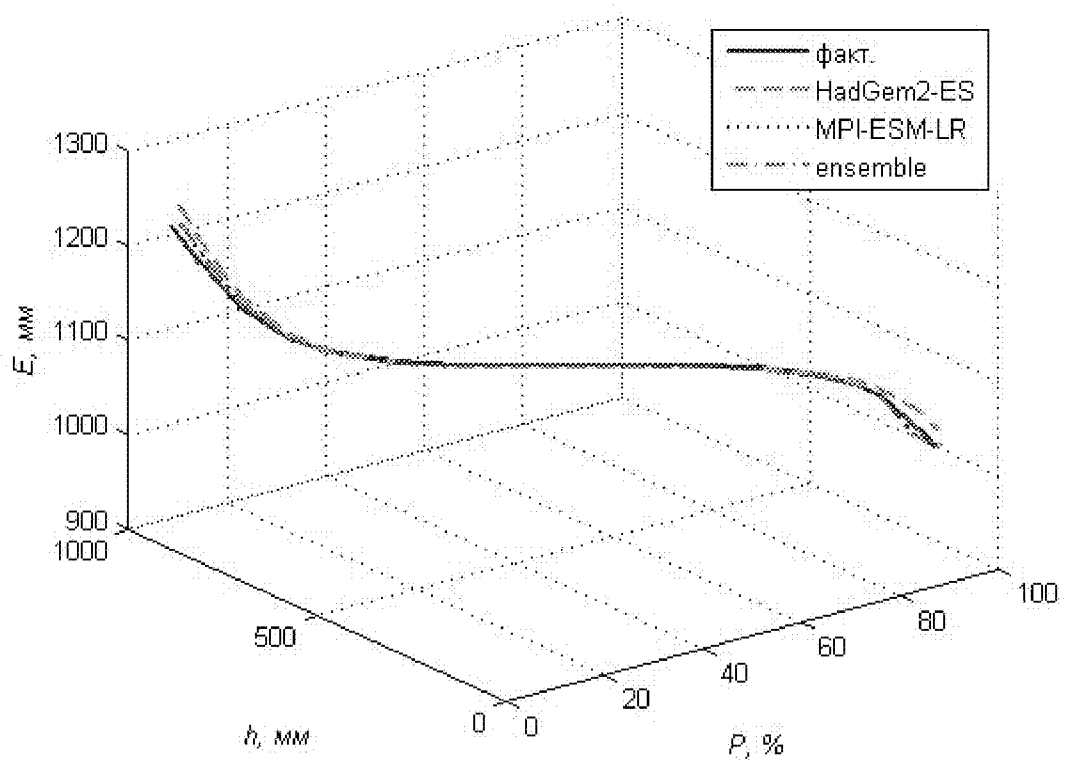
ав)

1339015



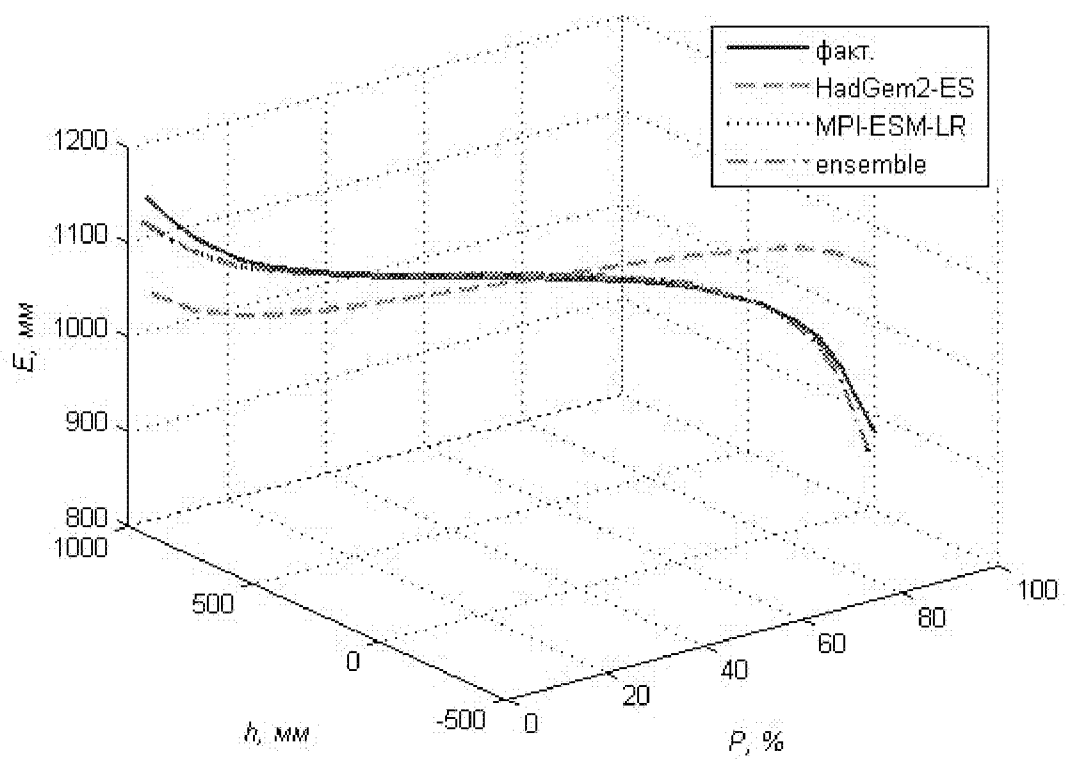
a2)

1340500



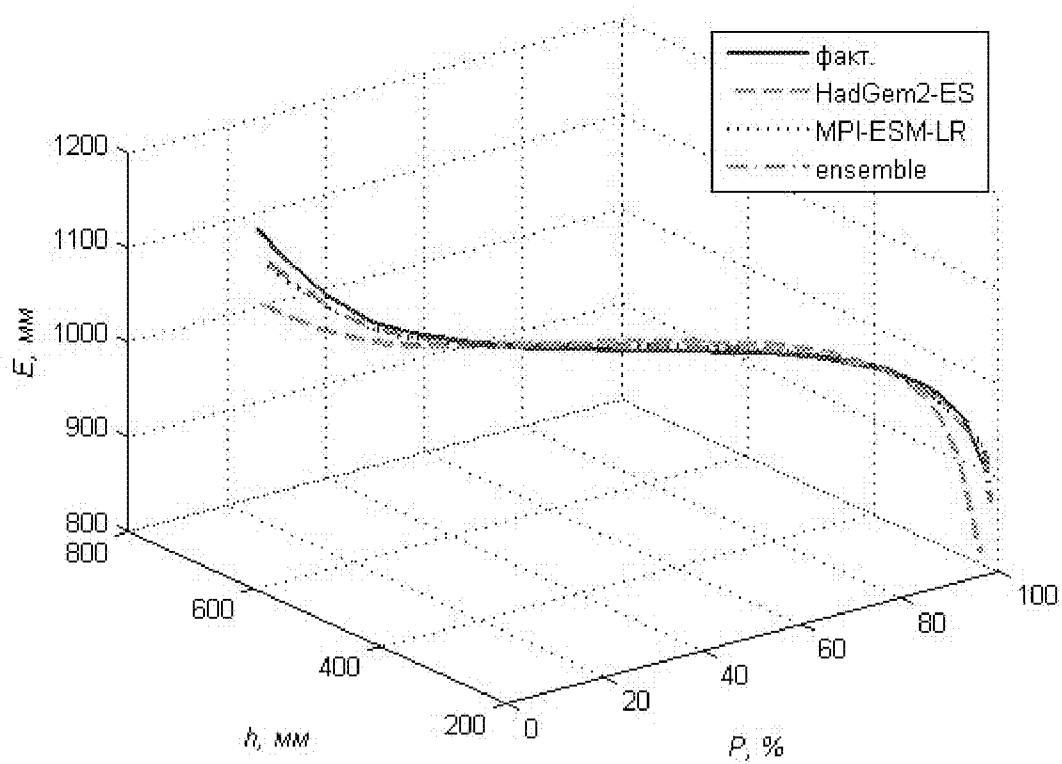
aд)

1339017



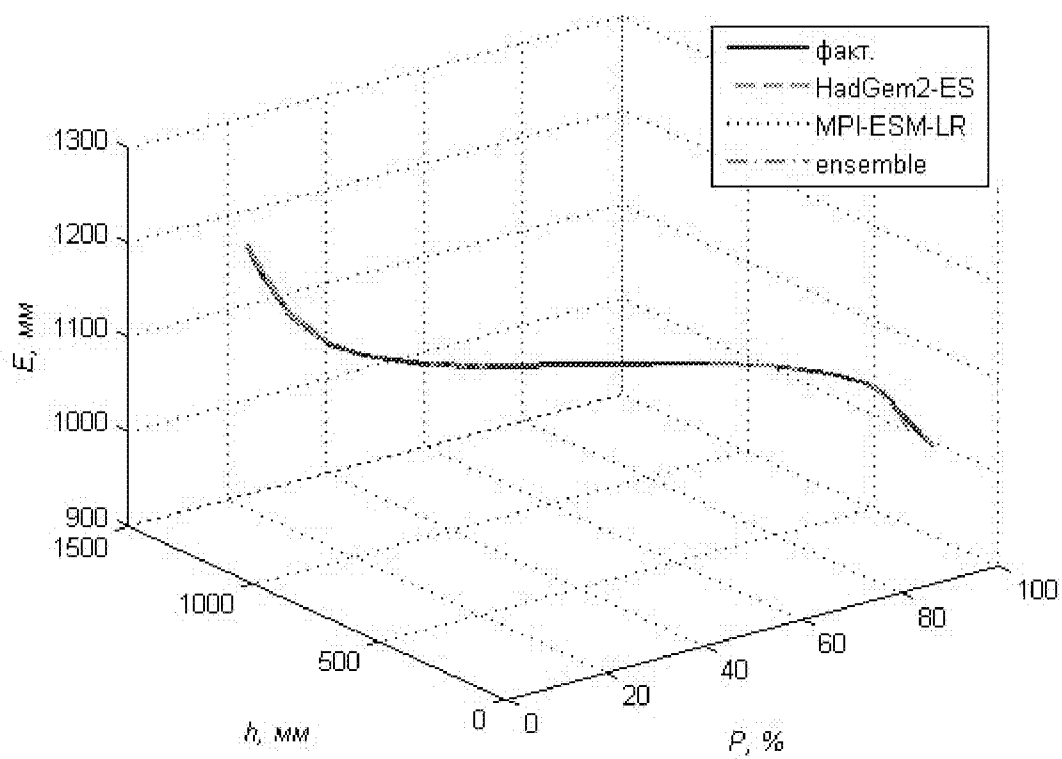
ae)

1348152



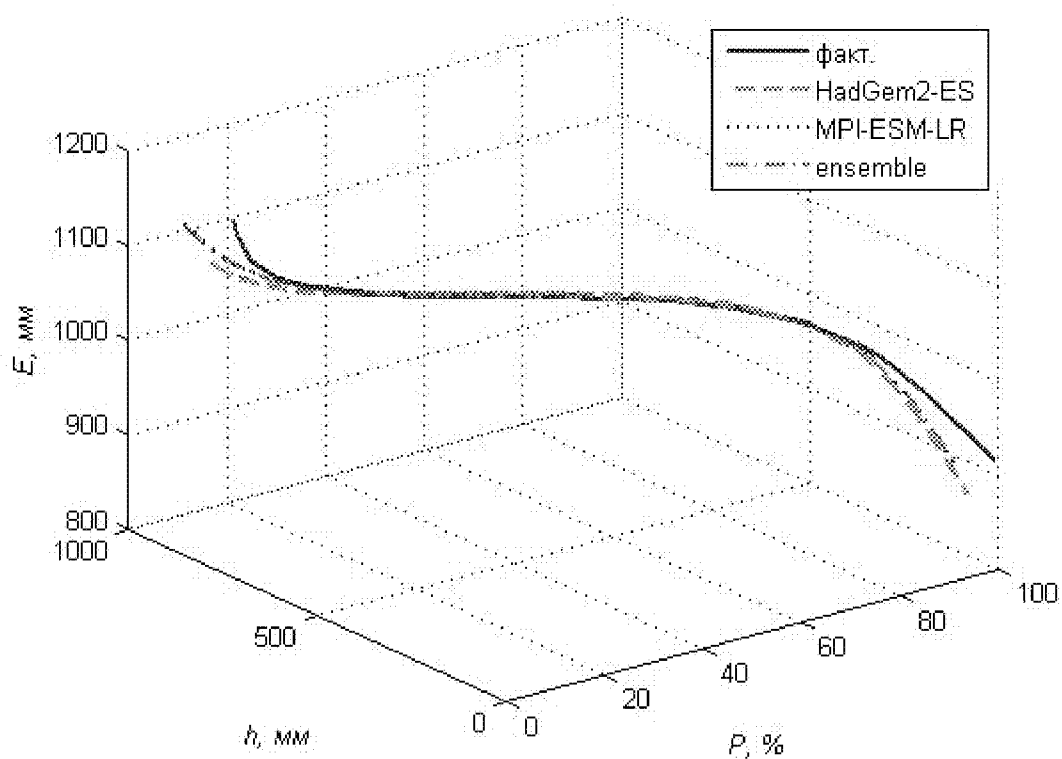
ажс)

1338600



au)

1338300



ак)

1537180

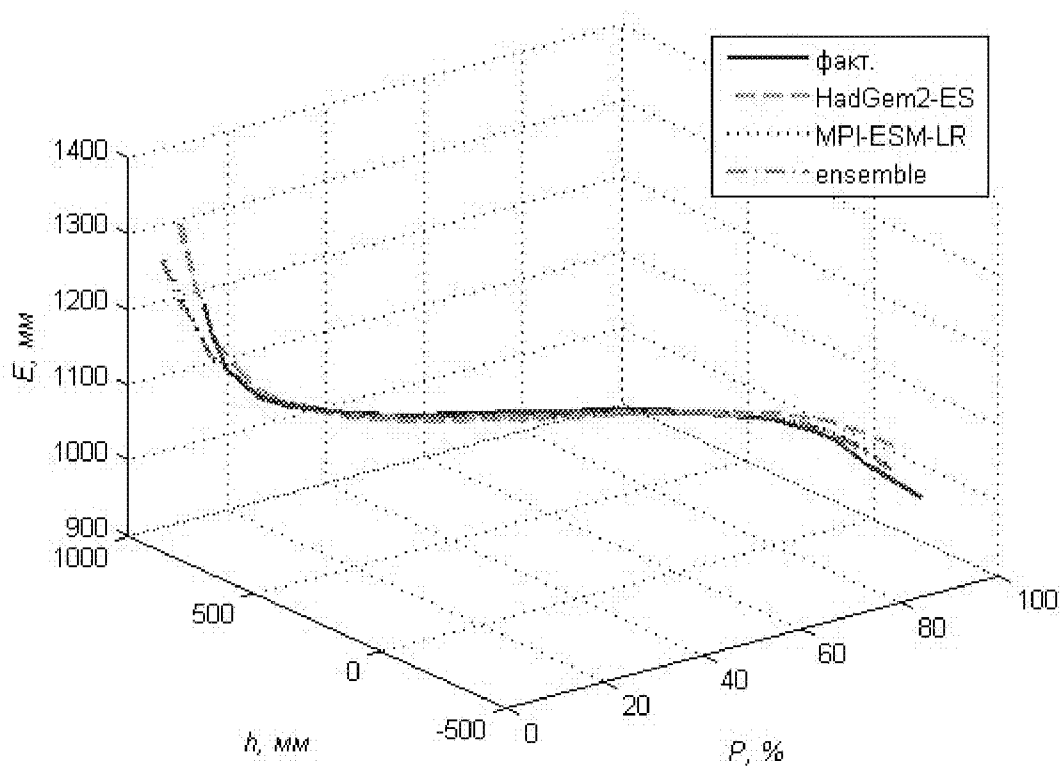
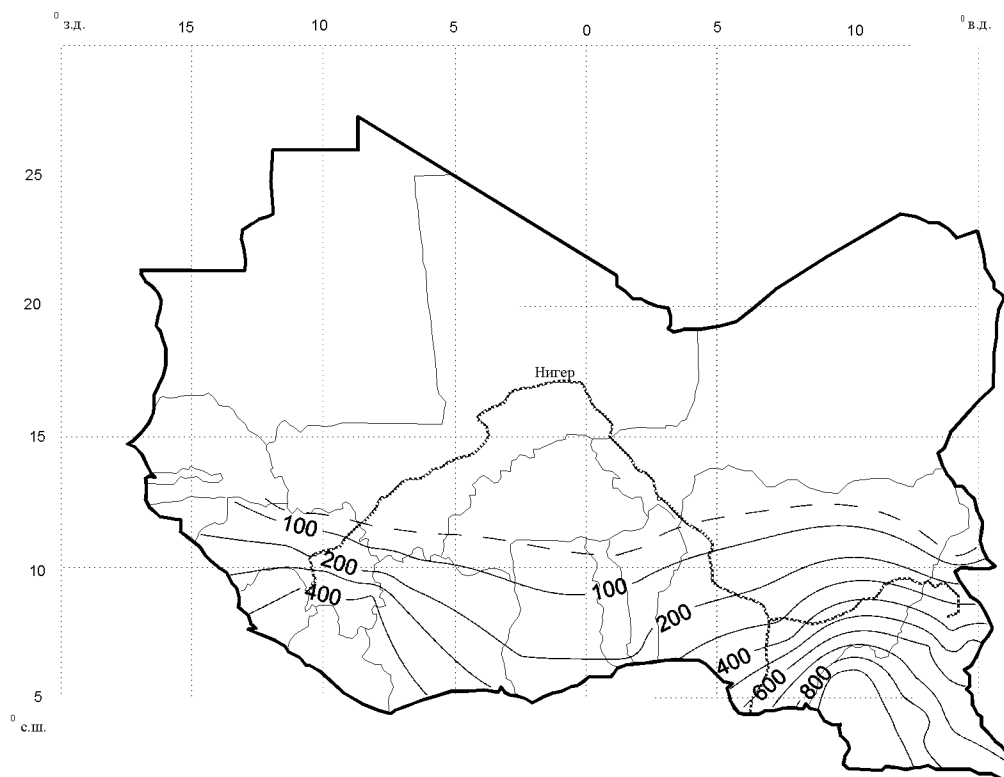


Рисунок И.1 – Одномерные многообразия для речных бассейнов Западной Африки.

ПРИЛОЖЕНИЕ К – Прогнозные карты статистических характеристик стока и испарения и их отклонений от фактических

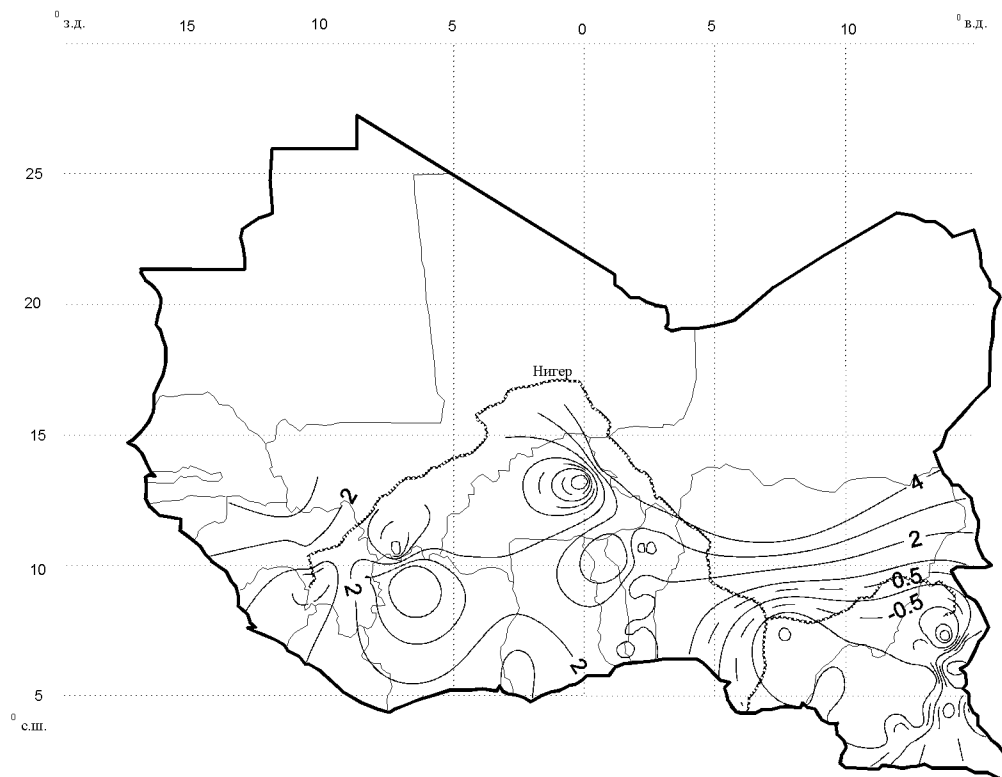
а)



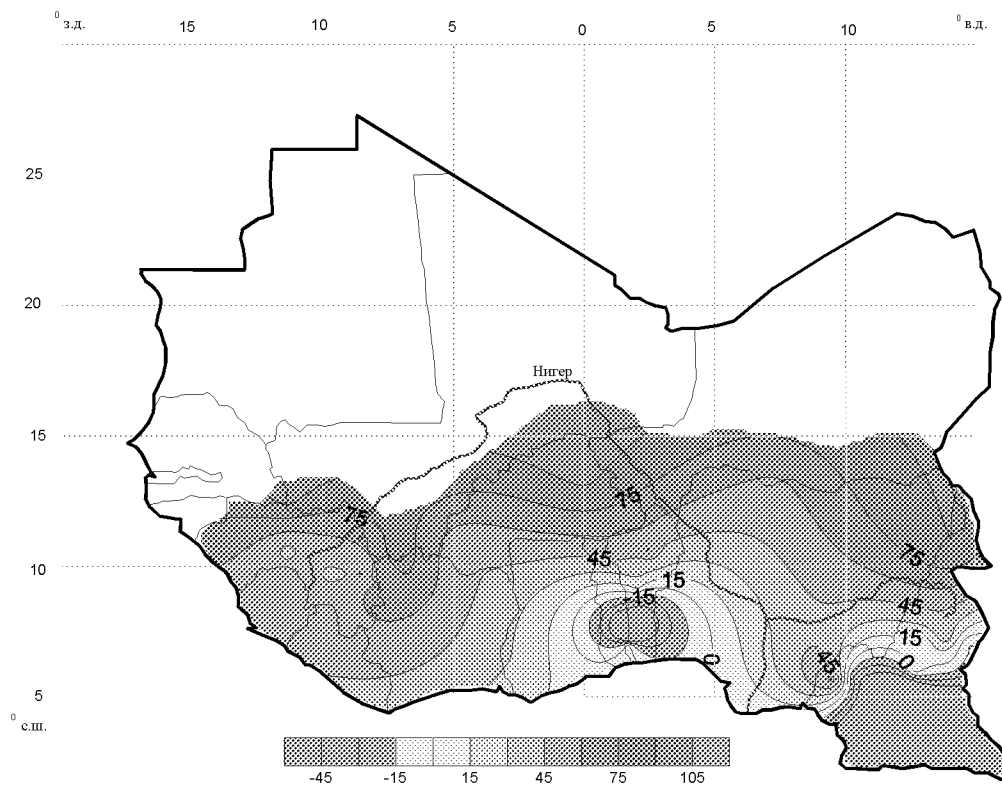
б)



6)



2)



д)

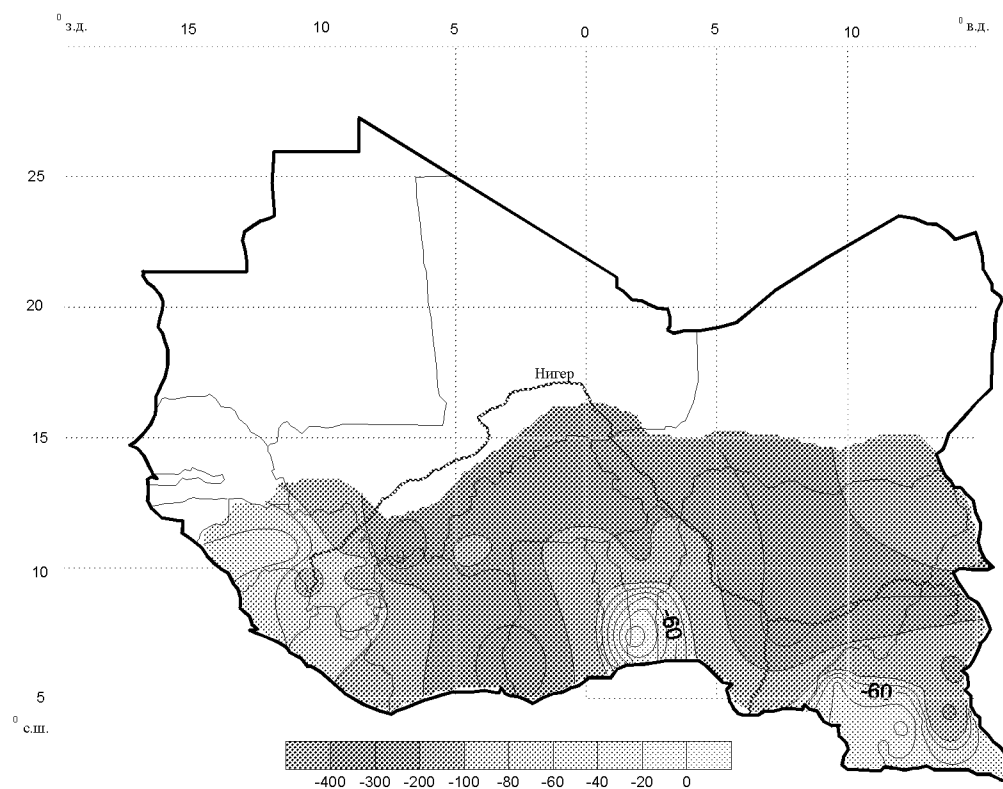
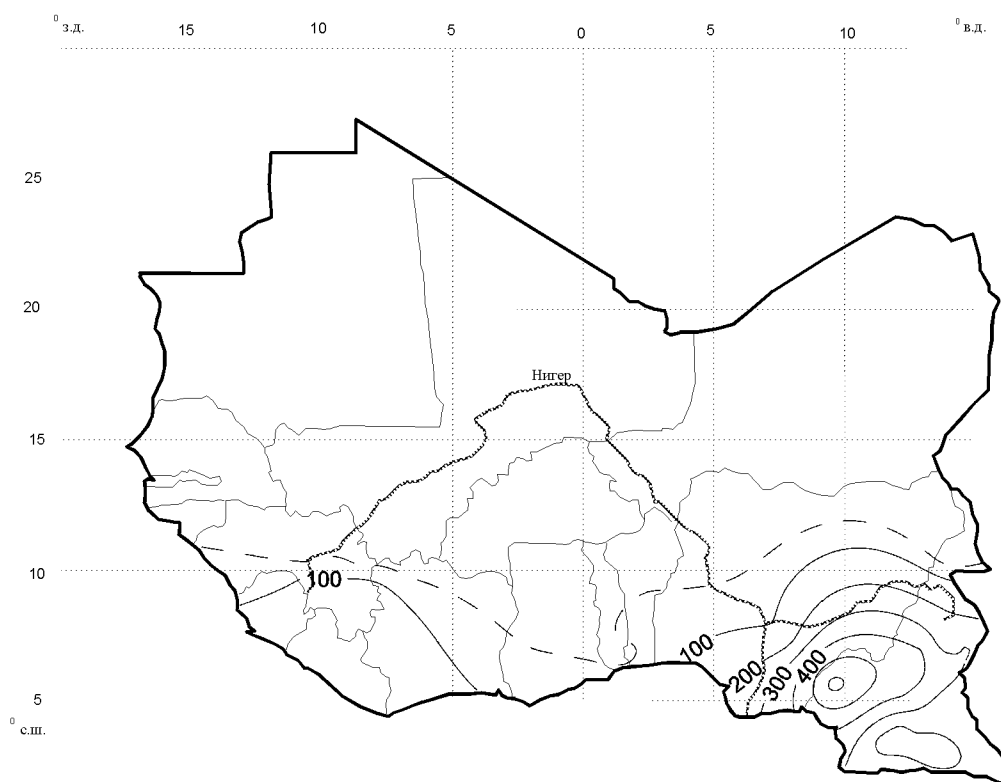
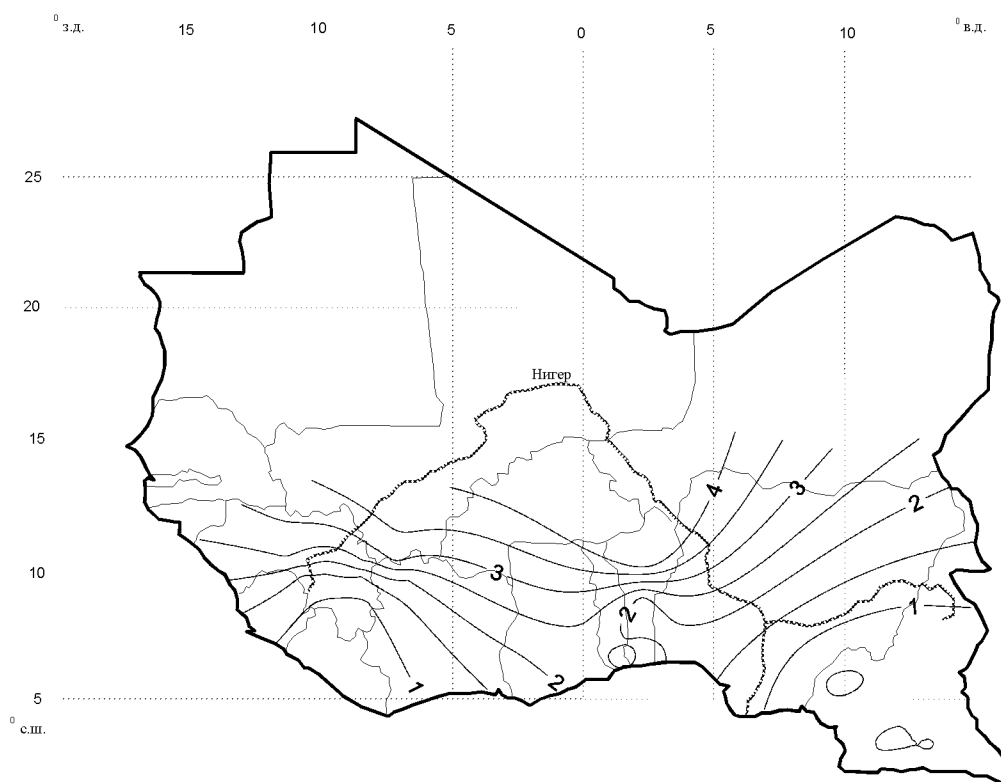


Рисунок К.1 – Распределение по ансамблевой модели (*ensemble*) на 2045 – 2065 гг.: *a* – нормы слоя стока, *б* – коэффициента вариации, *в* – коэффициента асимметрии, *г* – отклонения сценарной нормы стока от фактической, *д* – отклонения сценарного коэффициента вариации от фактического.

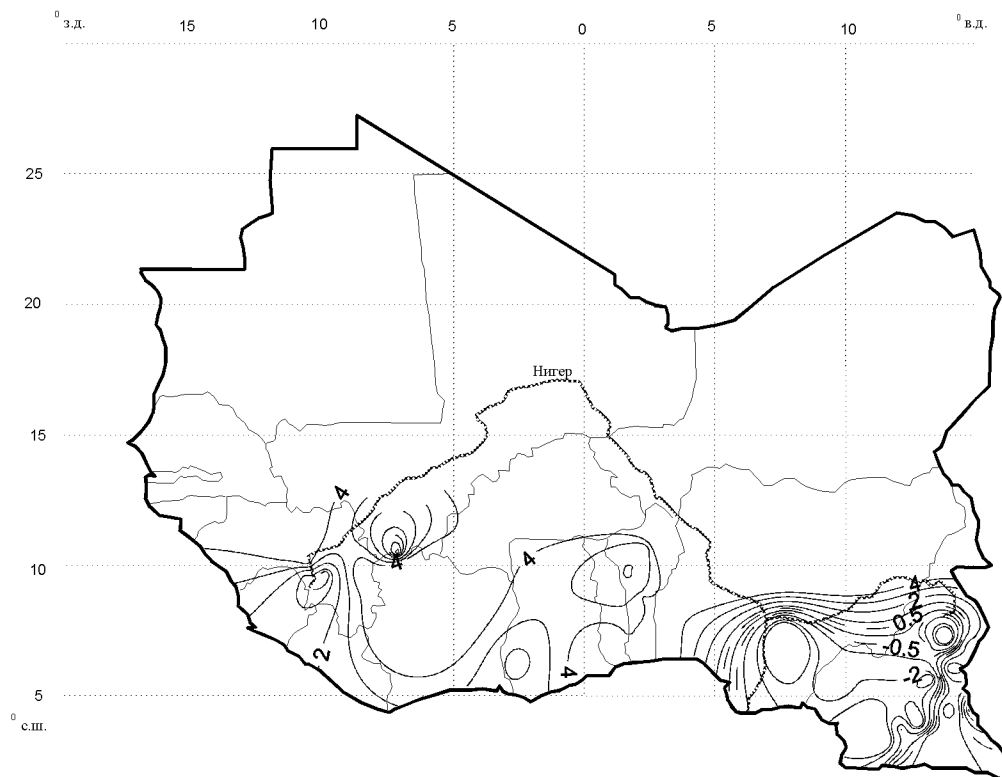
a)



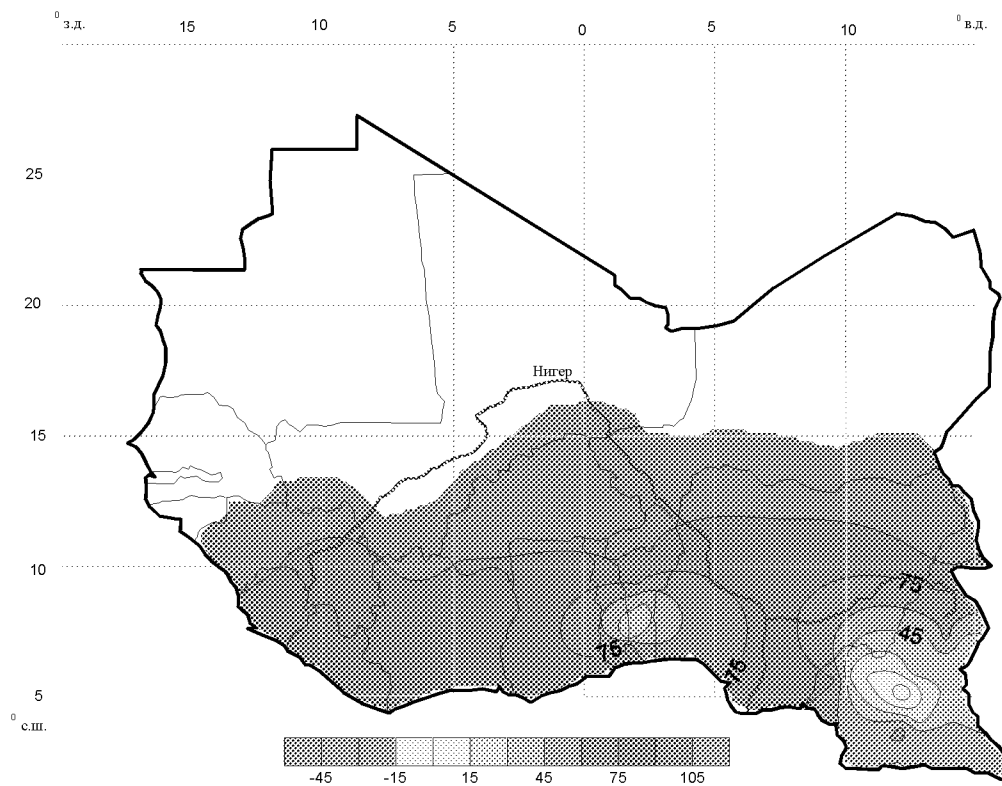
б)



6)



2)



д)

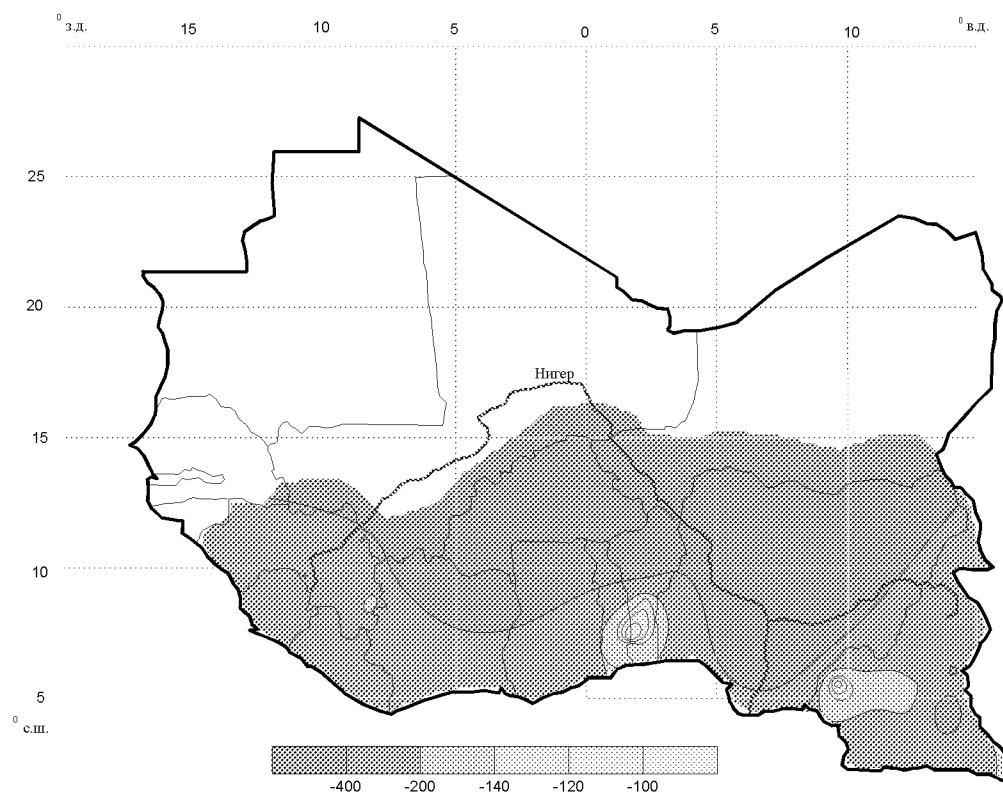
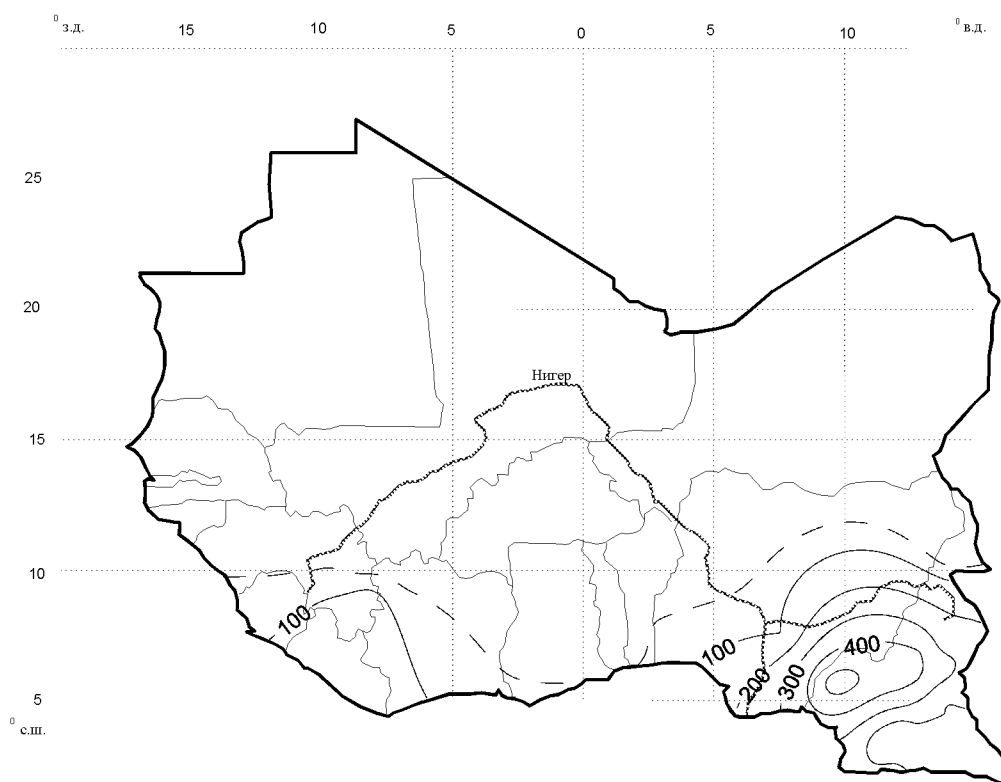


Рисунок К.2 – Распределение по ансамблевой модели (*HadGem2-ES*) на 2016 – 2035 гг.: *a* – нормы слоя стока, *b* – коэффициента вариации, *v* – коэффициента асимметрии, *z* – отклонения сценарной нормы стока от фактической, *d* – отклонения сценарного коэффициента вариации от фактического.

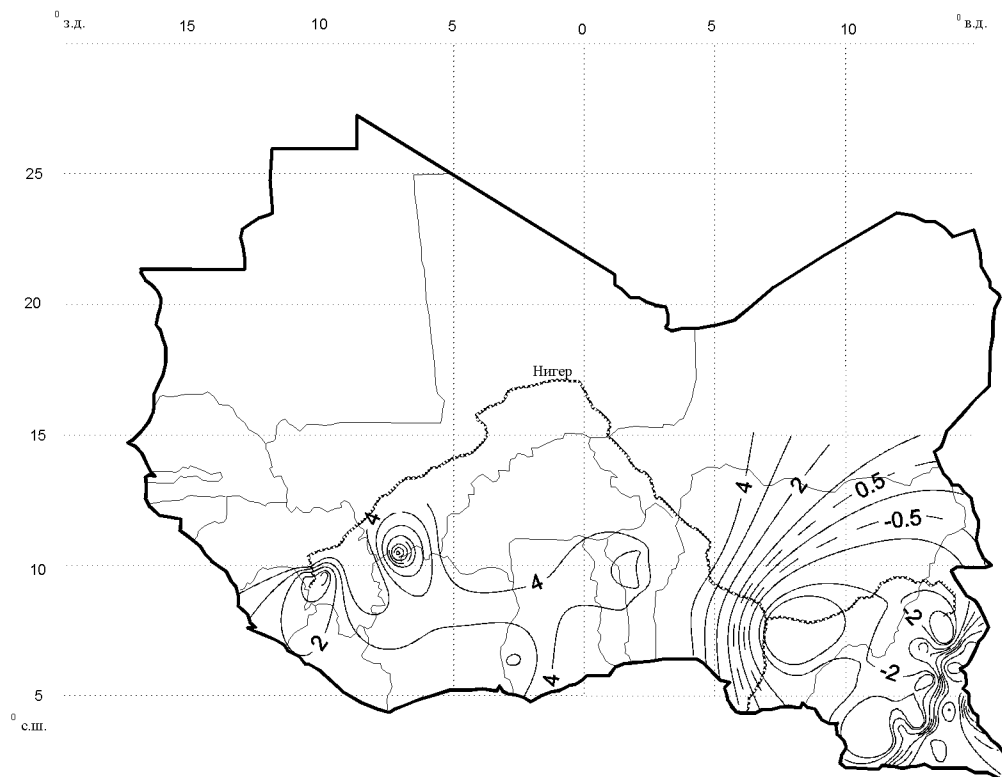
a)



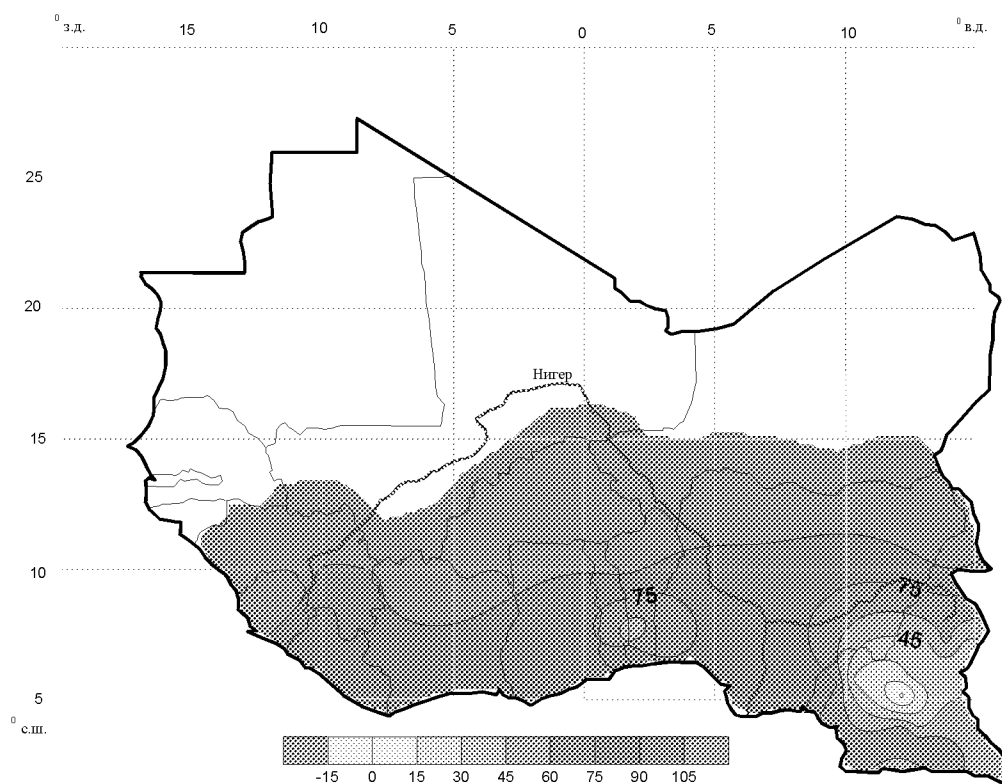
б)



6)



2)



д)

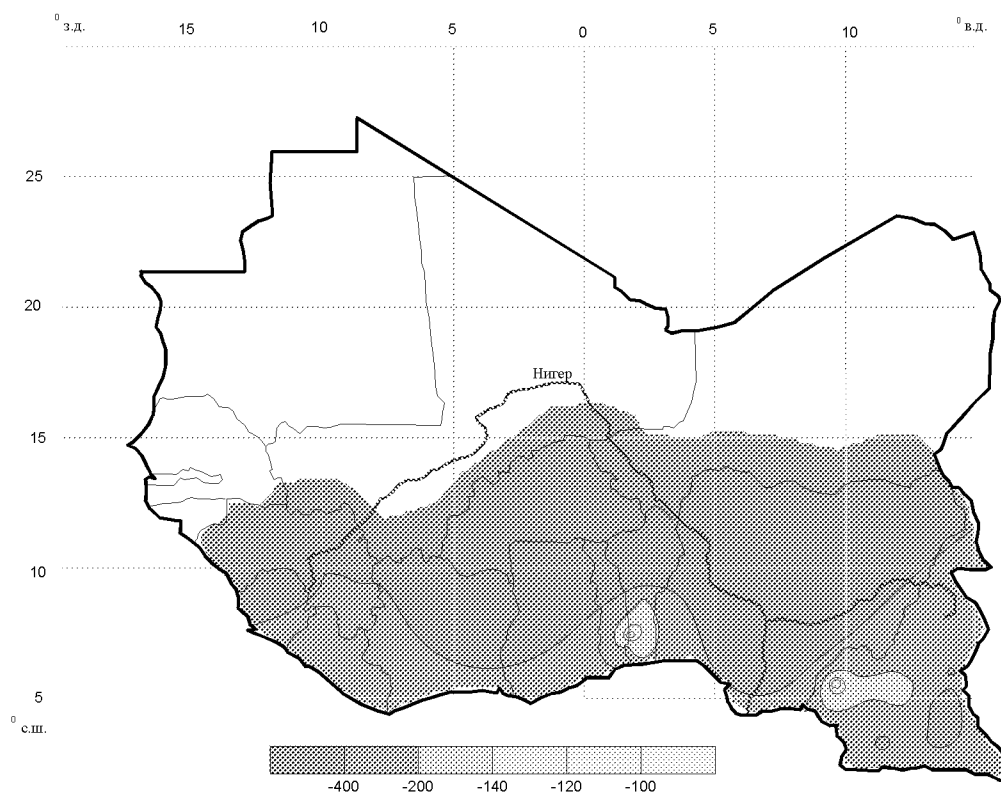
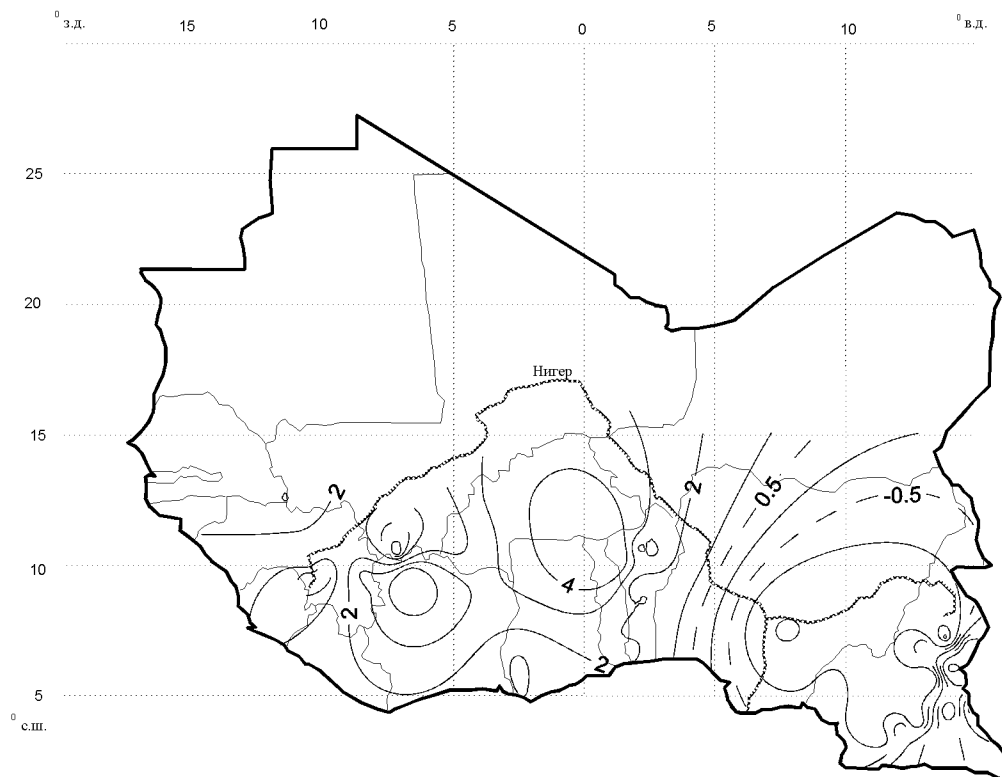
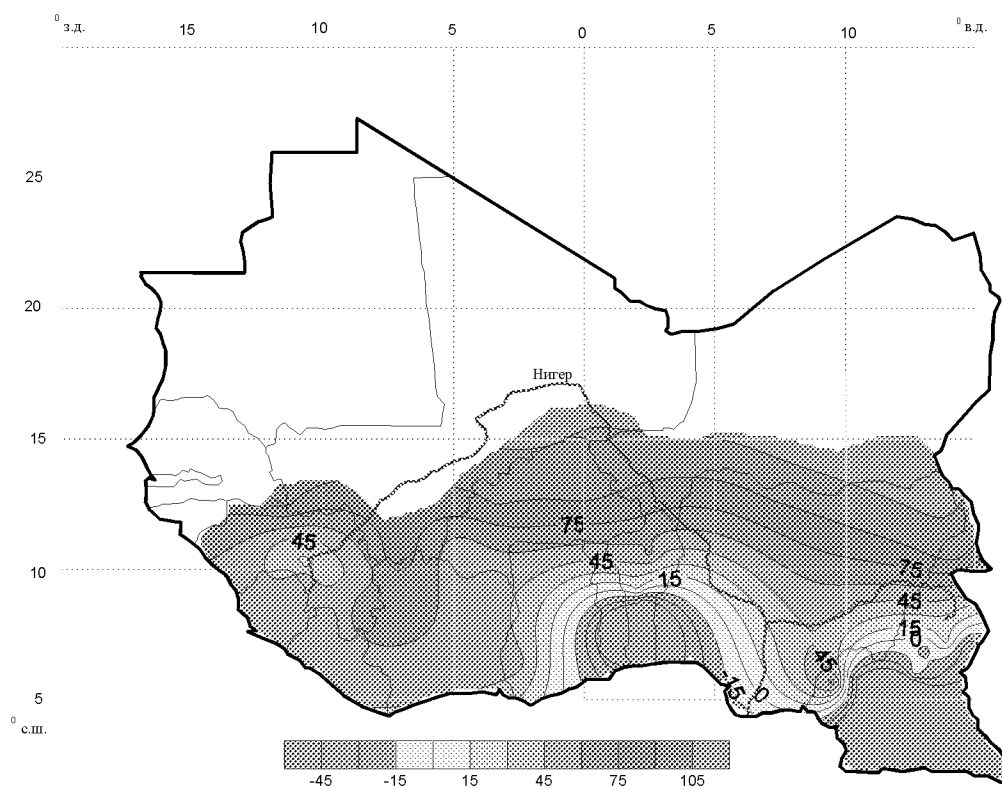


Рисунок К.3 – Распределение по ансамблевой модели (*HadGem2-ES*) на 2046 – 2065 гг.: *a* – нормы слоя стока, *b* – коэффициента вариации, *v* – коэффициента асимметрии, *z* – отклонения сценарной нормы стока от фактической, *d* – отклонения сценарного коэффициента вариации от фактического.

6)



2)



д)

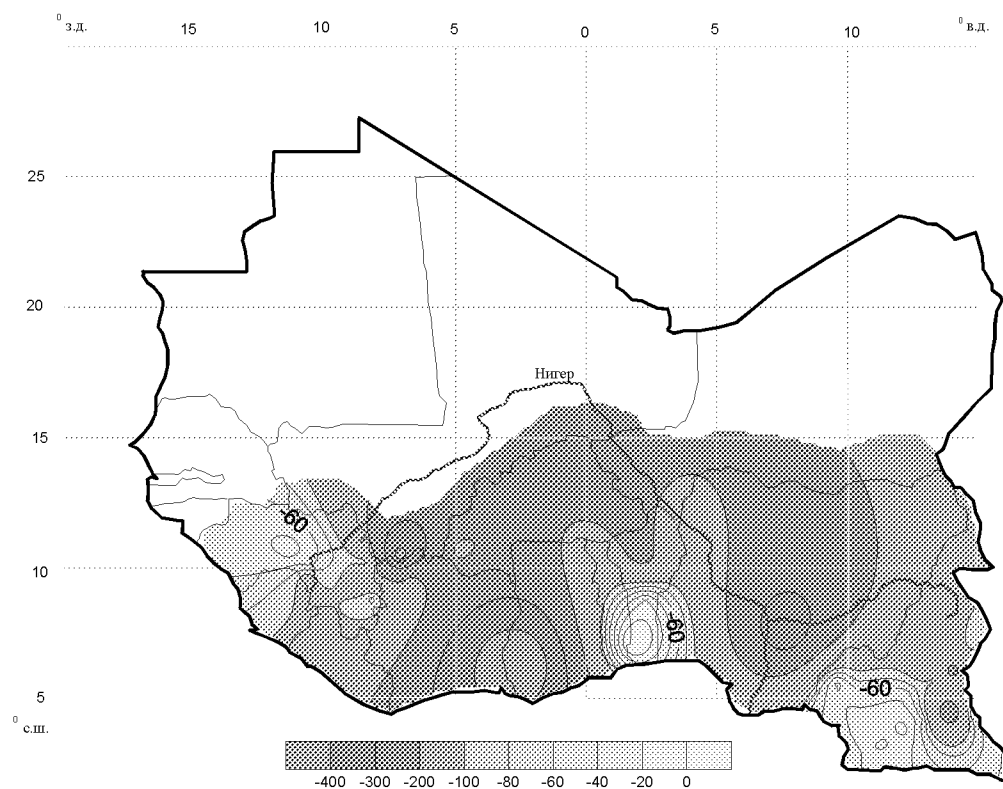
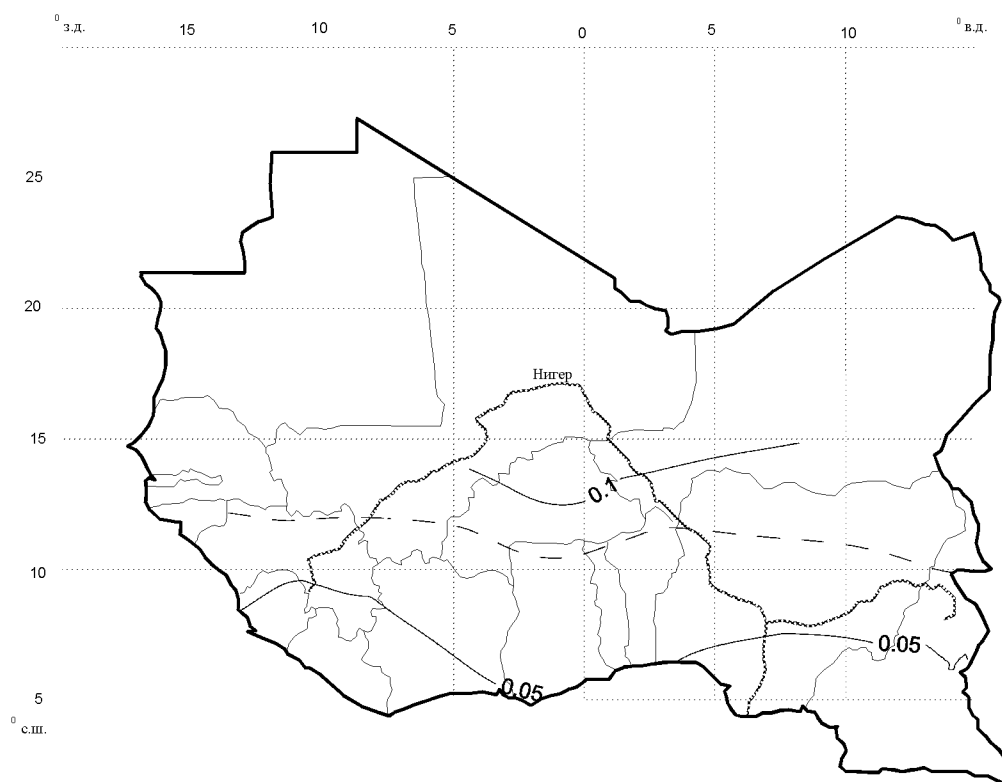


Рисунок К.4 – Распределение по ансамблевой модели (*MPI-ESM-LR*) на 2046 – 2065 гг.: *a* – нормы слоя стока, *б* – коэффициента вариации, *в* – коэффициента асимметрии, *г* – отклонения сценарной нормы стока от фактической, *д* – отклонения сценарного коэффициента вариации от фактического.

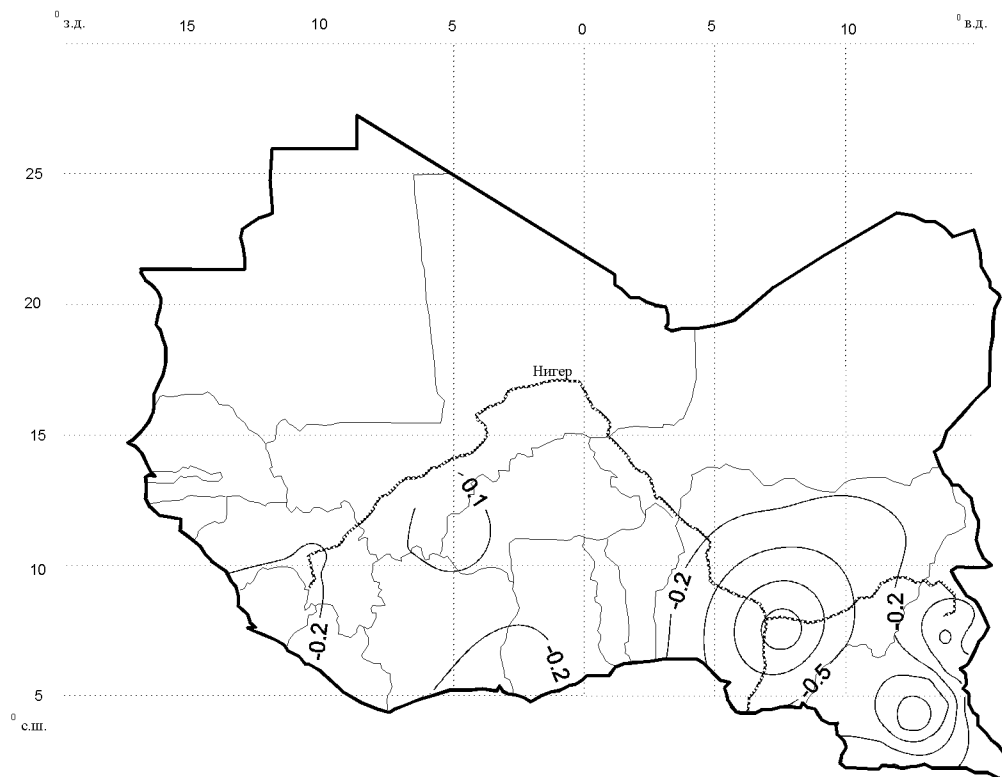
a)



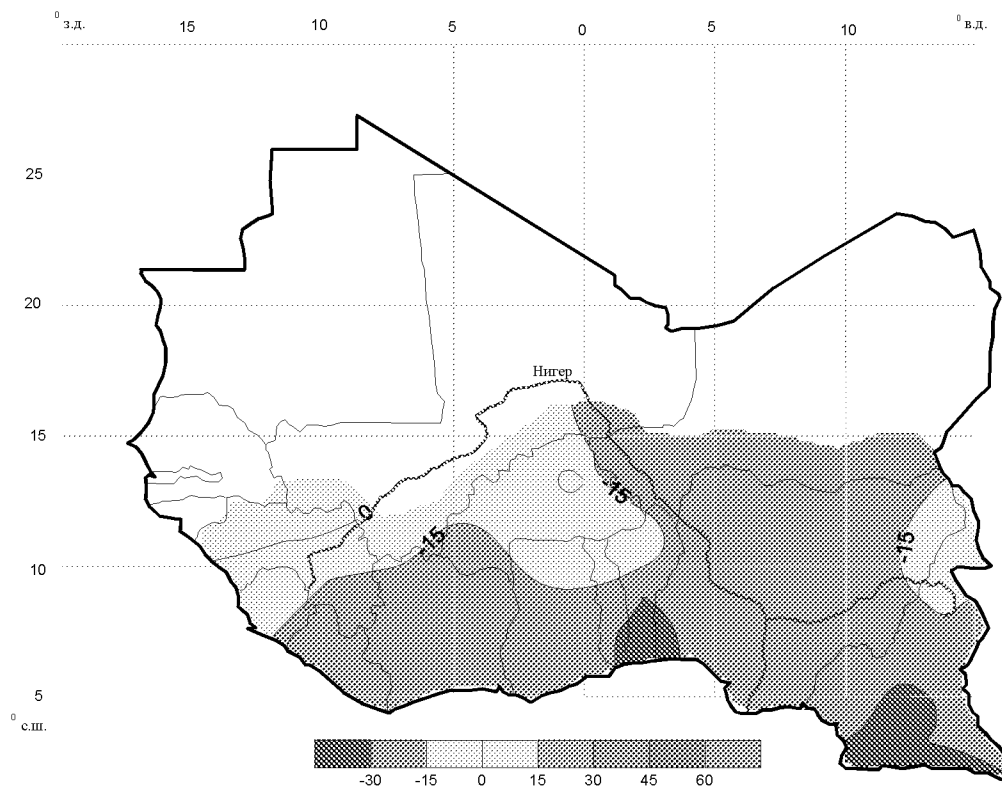
б)



6)



2)



д)

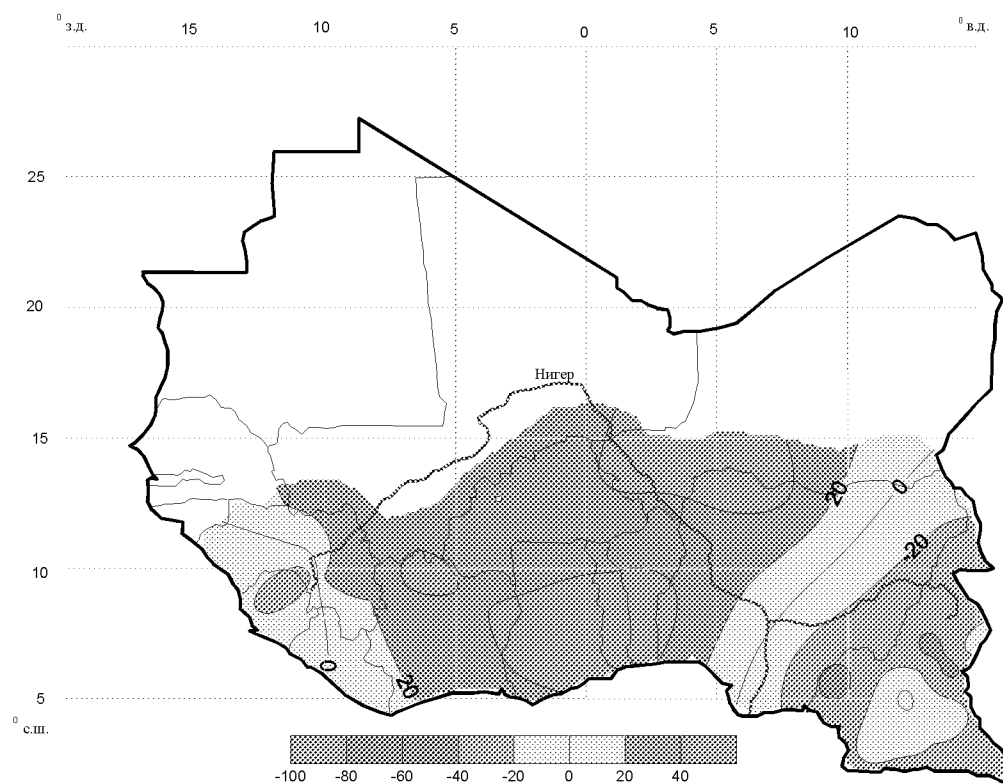
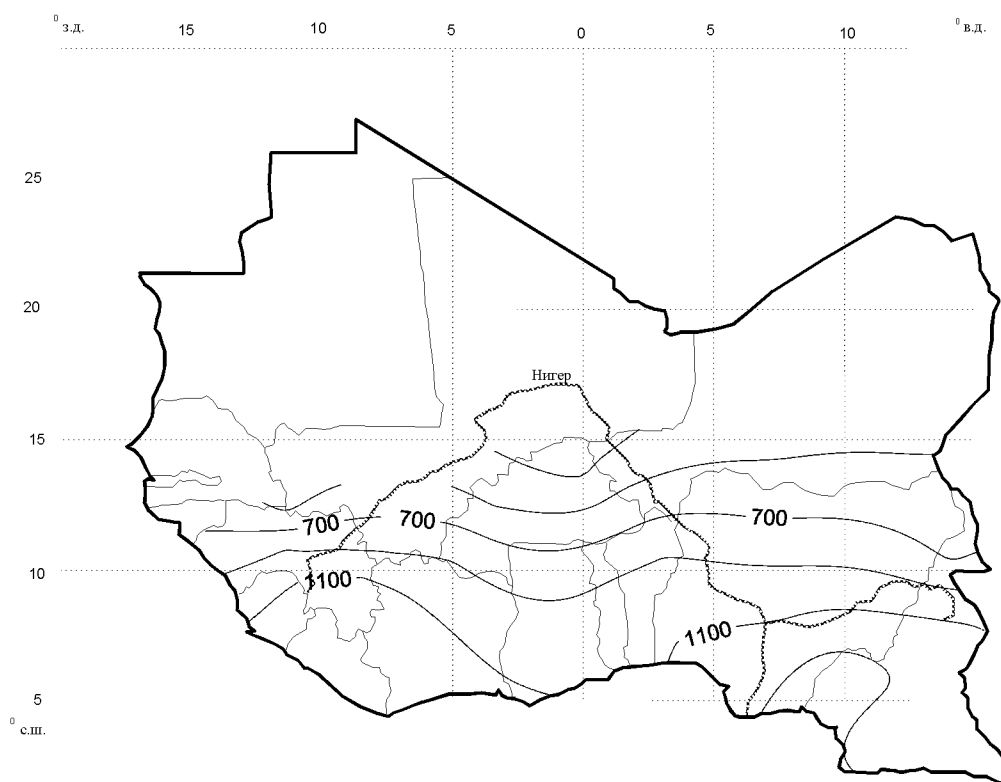
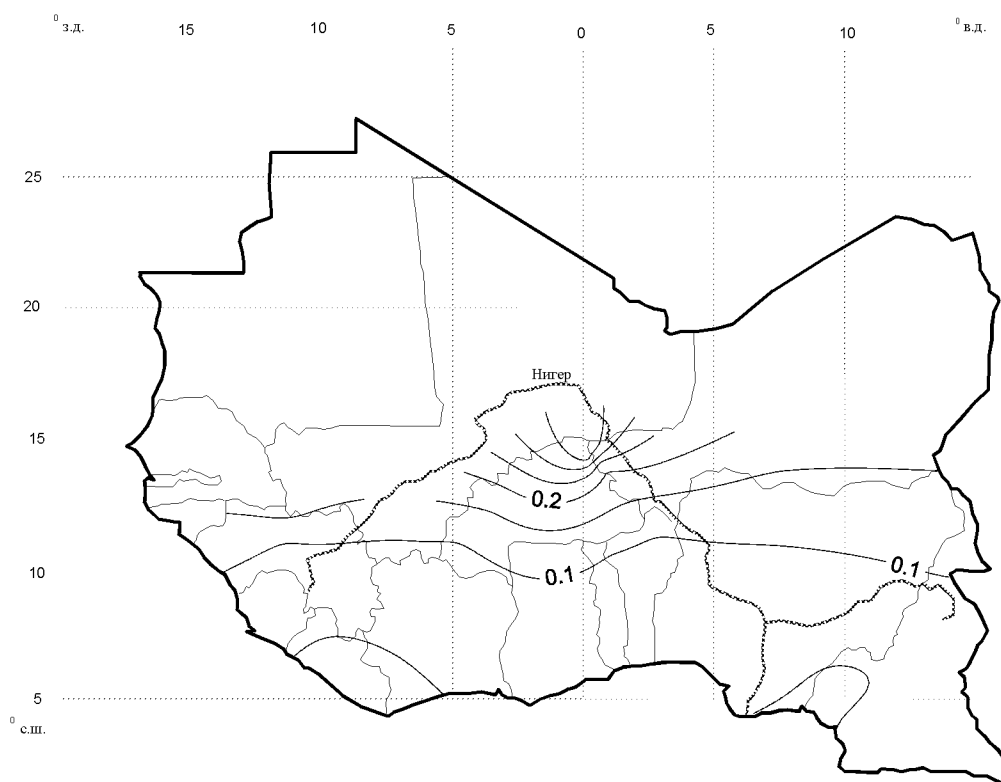


Рисунок К.5 – Распределение по ансамблевой модели (*ensemble*) на 2046 – 2065 гг.: *a* – нормы испарения, *б* – коэффициента вариации, *в* – коэффициента асимметрии, *г* – отклонения сценарной нормы испарения от фактической, *д* – отклонения сценарного коэффициента вариации от фактического.

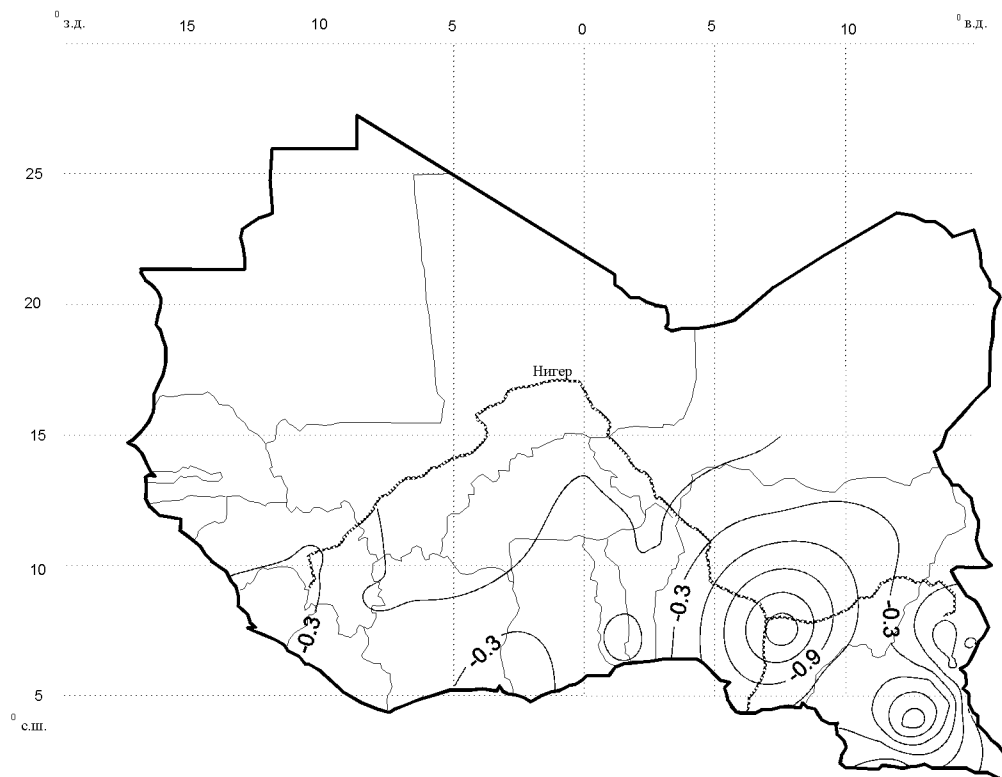
a)



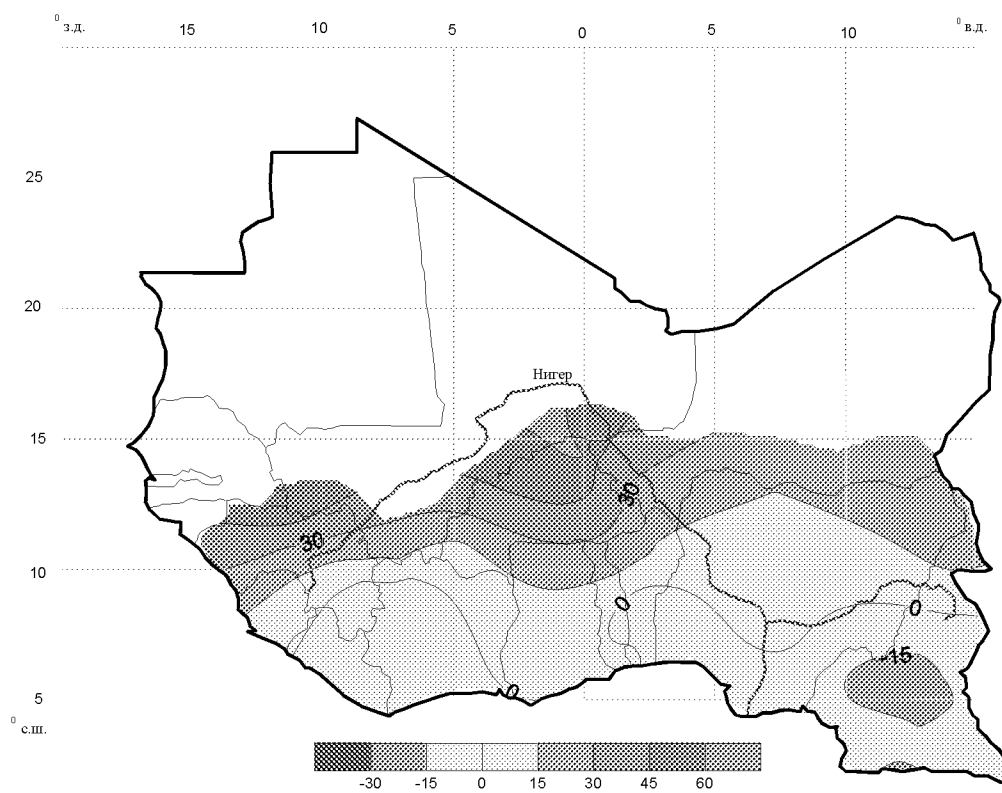
б)



6)



2)



д)

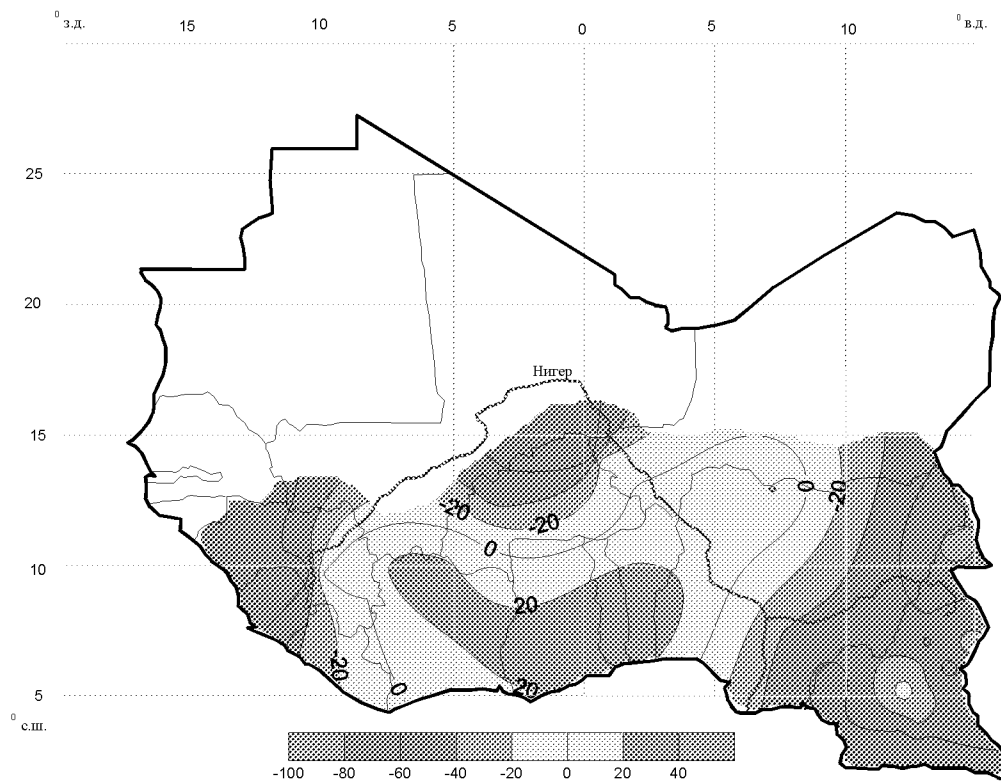
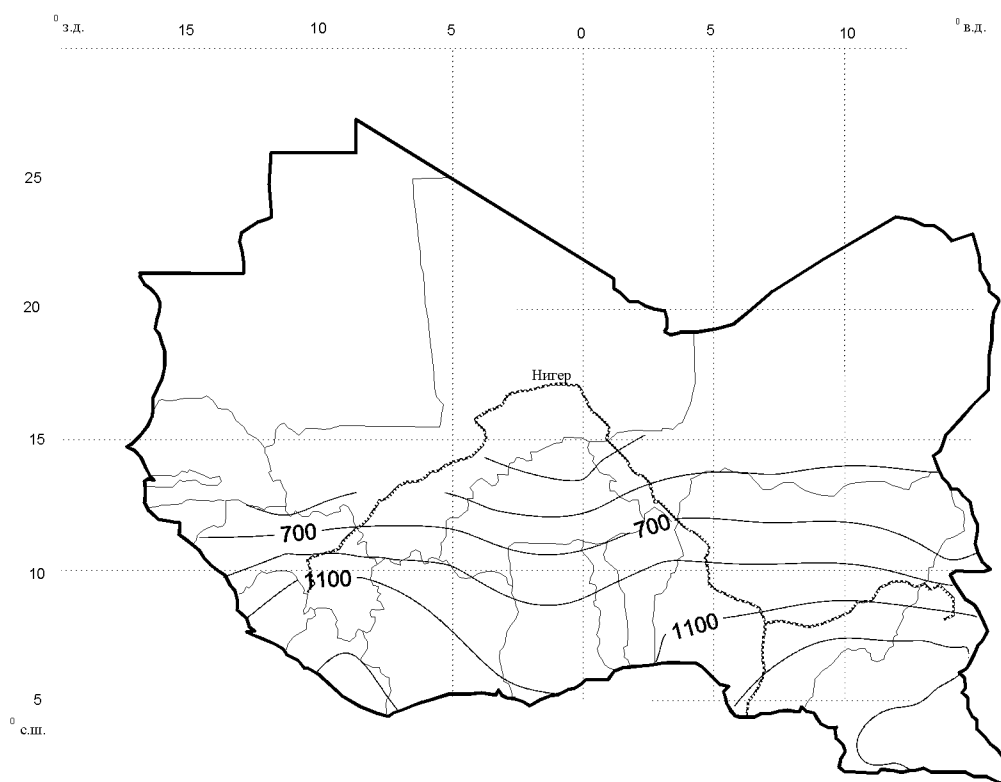
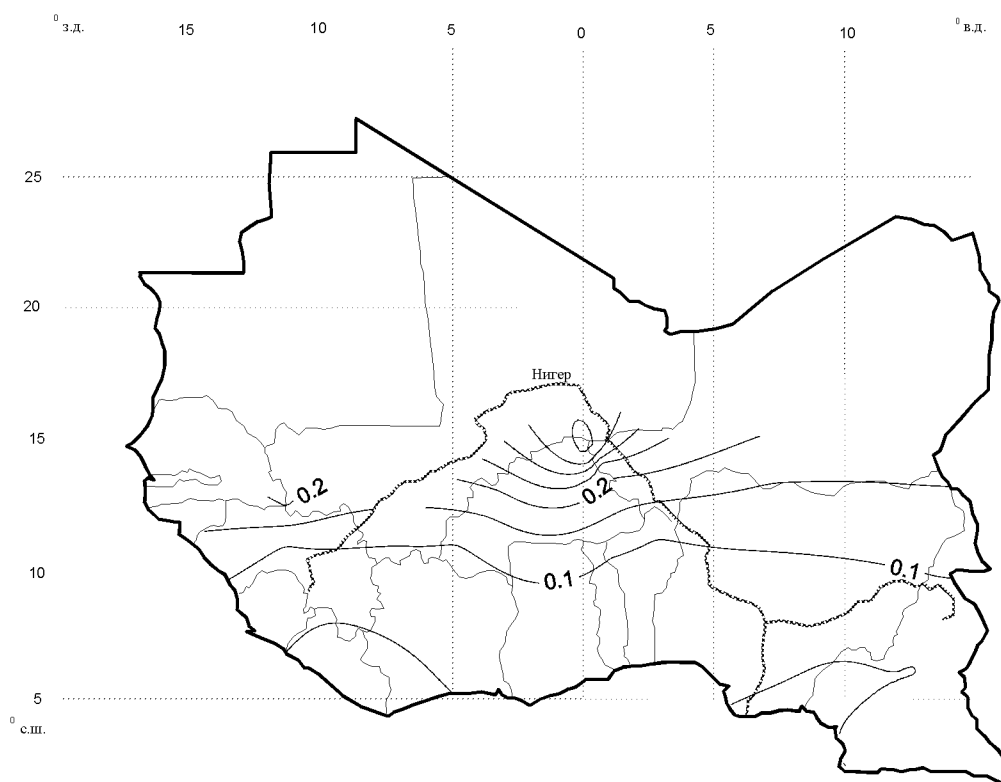


Рисунок К.6 – Распределение по ансамблевой модели (*HadGem2-ES*) на 2016 – 2035 гг.: *a* – нормы испарения, *b* – коэффициента вариации, *v* – коэффициента асимметрии, *z* – отклонения сценарной нормы испарения от фактической, *д* – отклонения сценарного коэффициента вариации от фактического.

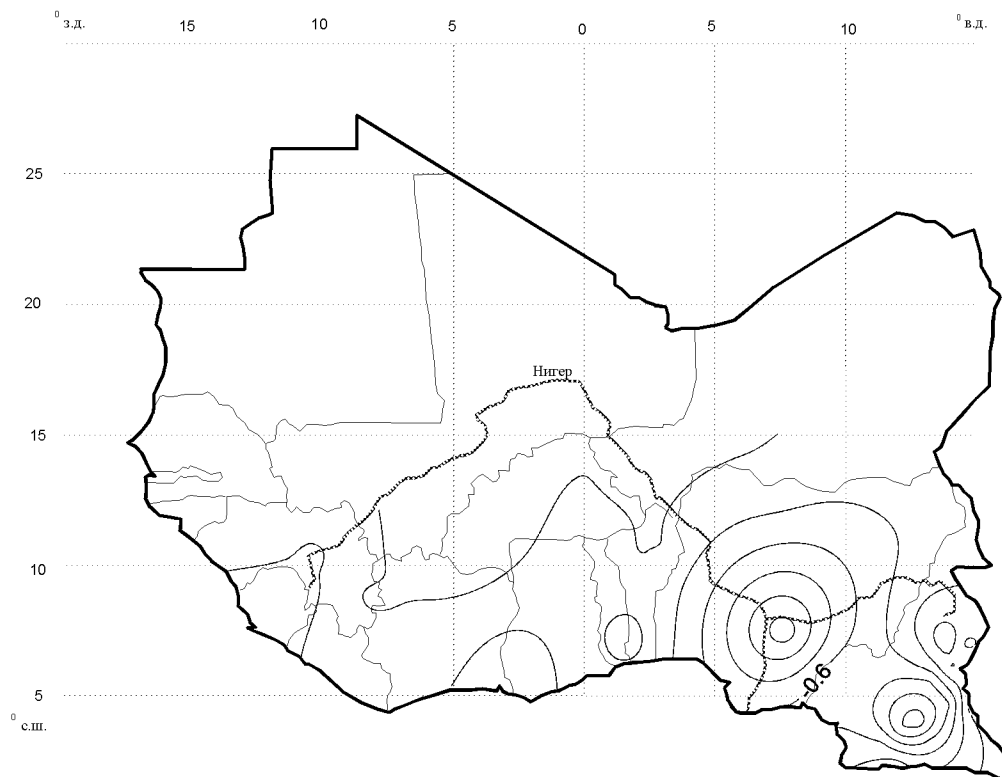
a)



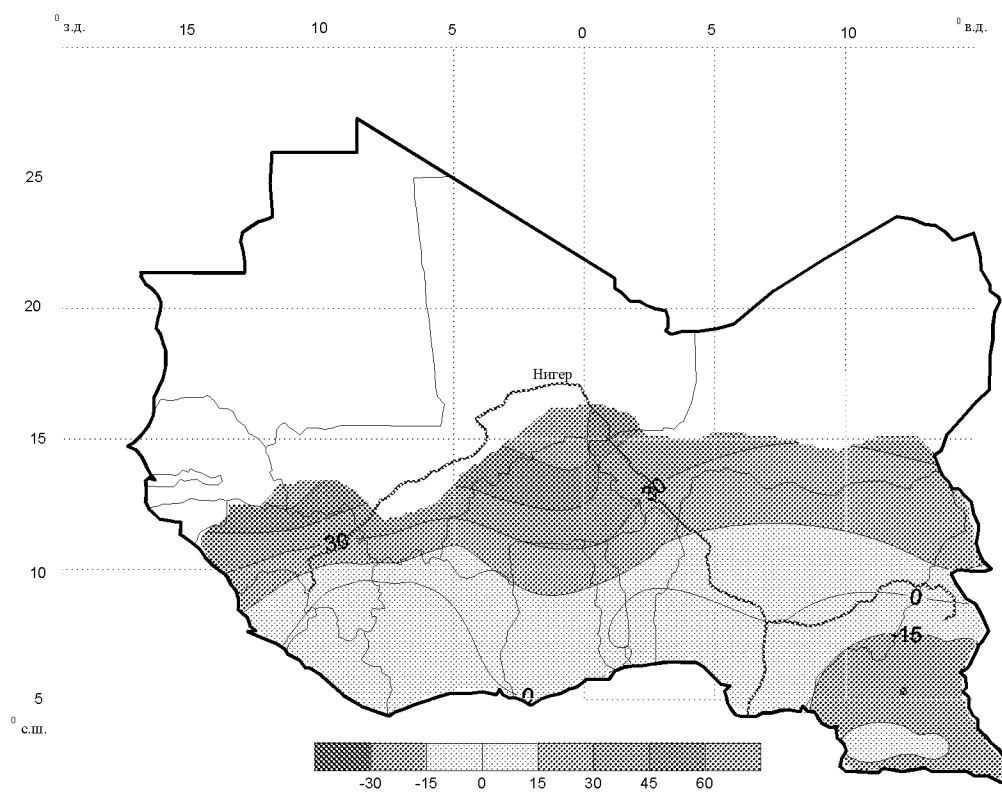
б)



6)



2)



д)

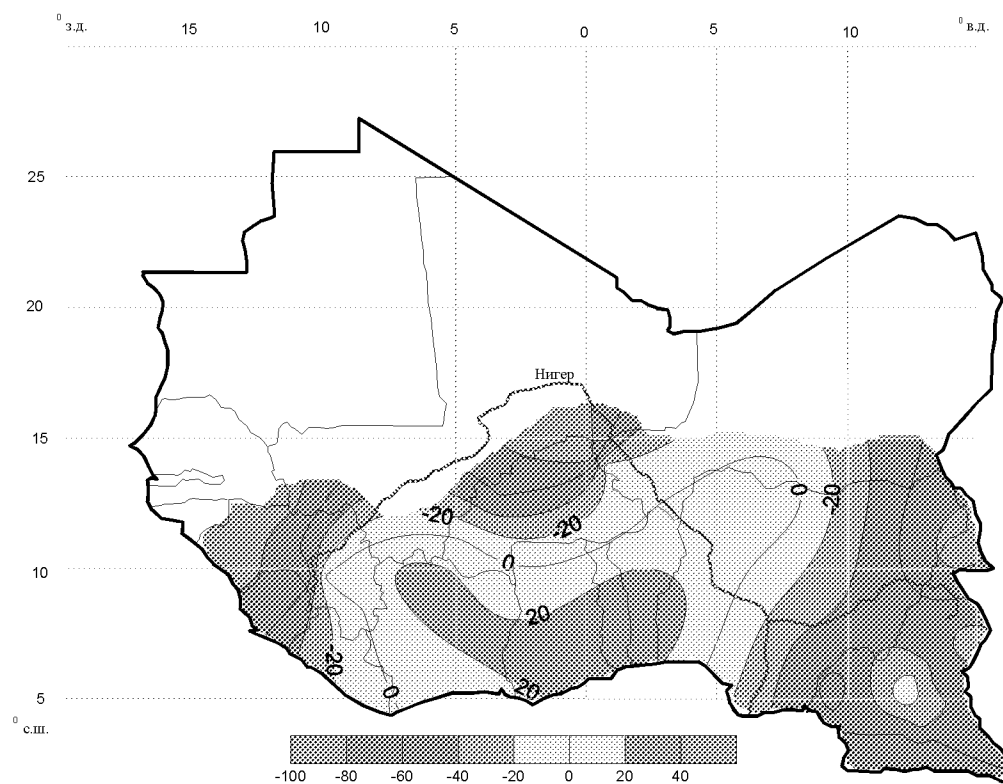
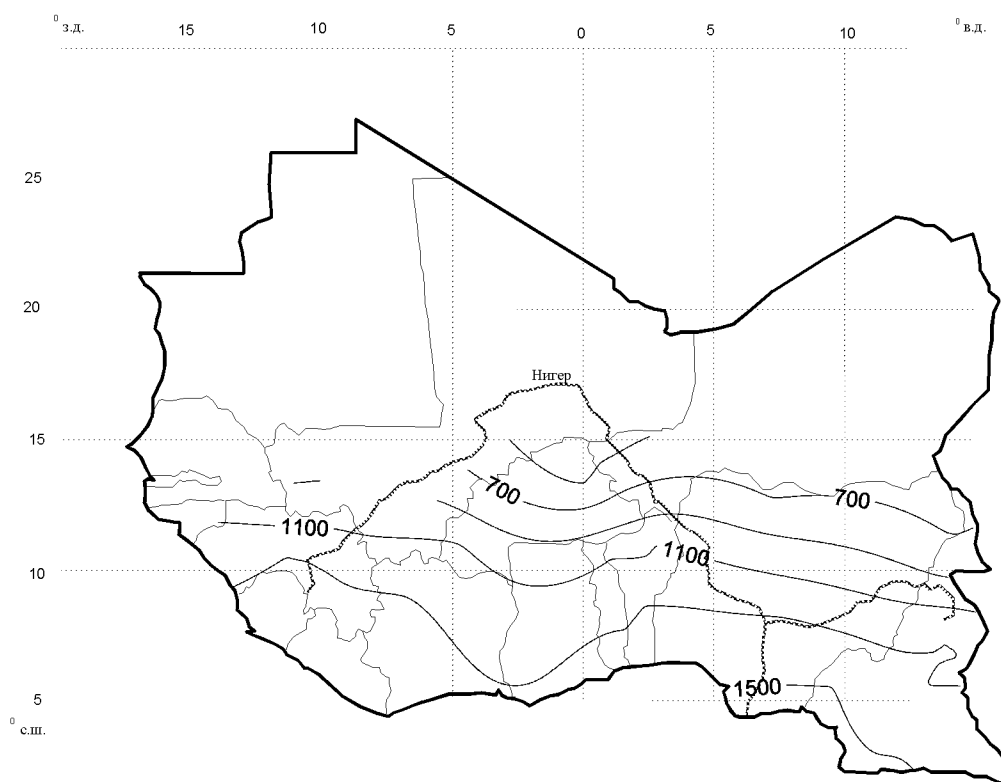
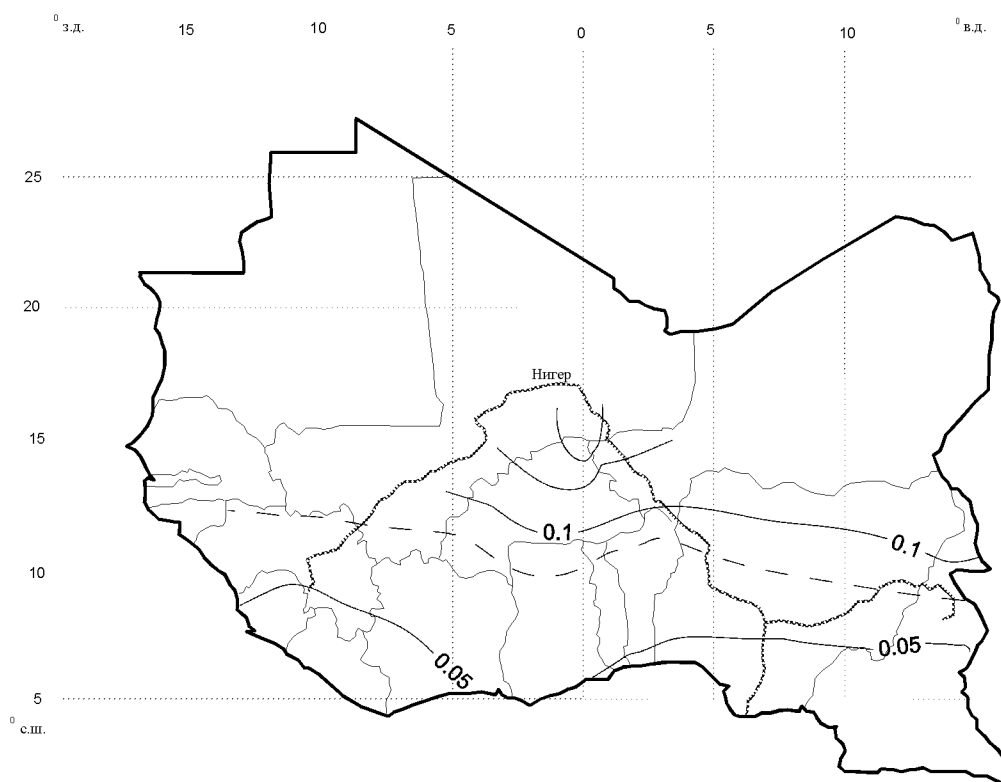


Рисунок К.7 – Распределение по ансамблевой модели (*HadGem2-ES*) на 2046 – 2065 гг.: *a* – нормы испарения, *б* – коэффициента вариации, *в* – коэффициента асимметрии, *г* – отклонения сценарной нормы испарения от фактической, *д* – отклонения сценарного коэффициента вариации от фактического.

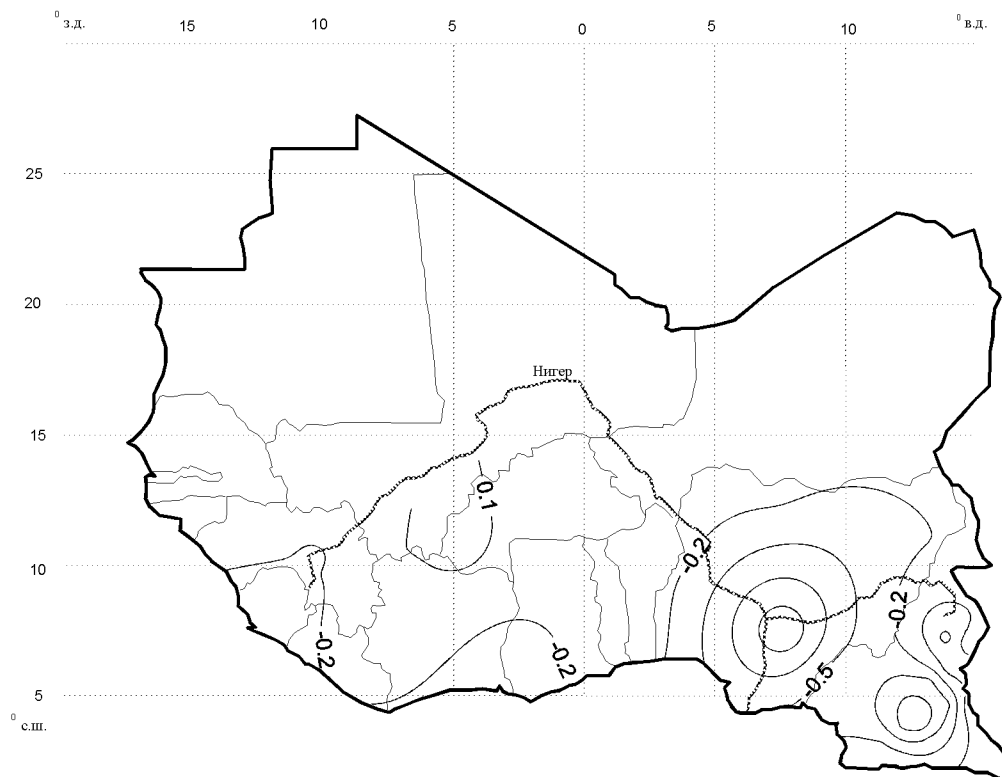
a)



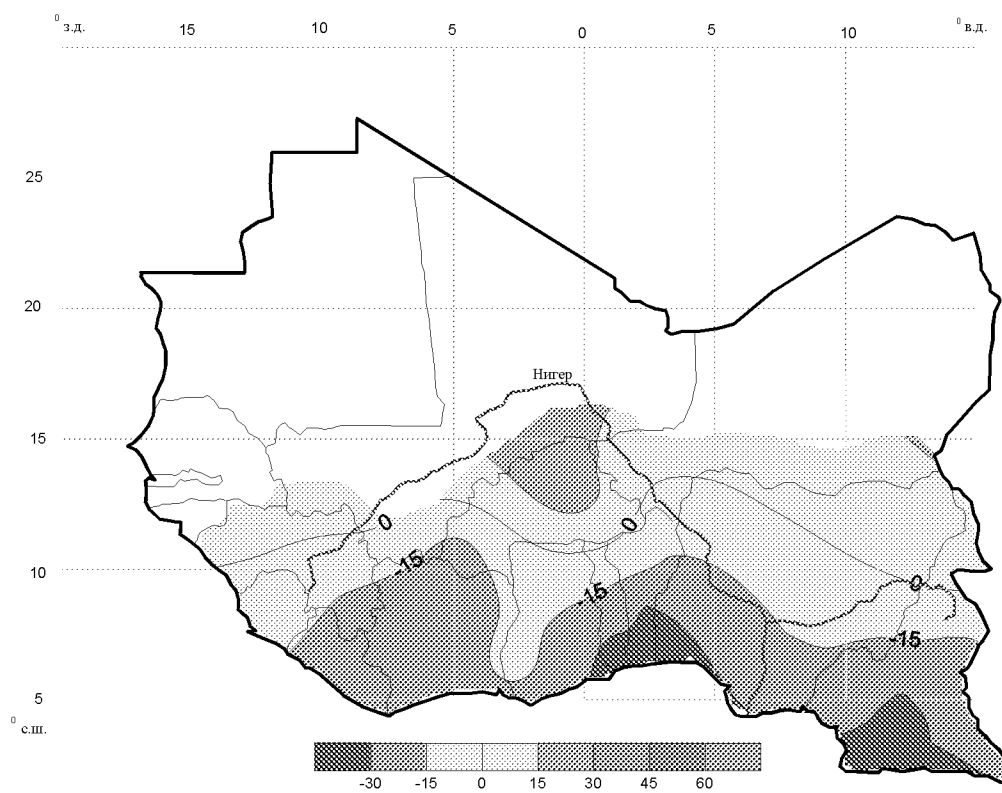
б)



б)



в)



д)

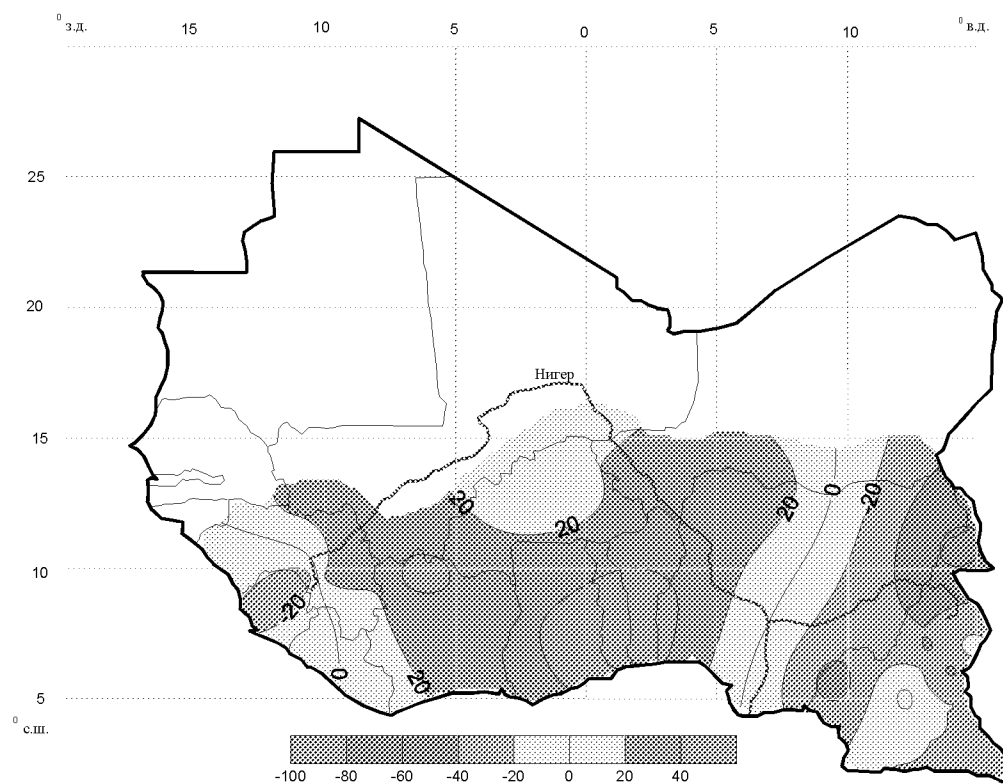


Рисунок К.8 – Распределение по ансамблевой модели (*MPI-ESM-LR*) на 2046 – 2065 гг.: *a* – нормы испарения, *б* – коэффициента вариации, *в* – коэффициента асимметрии, *г* – отклонения сценарной нормы испарения от фактической, *д* – отклонения сценарного коэффициента вариации от фактического.

ПРИЛОЖЕНИЕ Л – Выписка о прохождении педагогической практики

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрофизики и гидропрогнозов

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой

Ковалева М. В.
(подпись) (фамилия, имя, отчество)
«19» 02 2016 года

Задание

на выпускную квалификационную работу

студенту(ке) Сивковски Иосифу

(фамилия, имя, отчество)

1. Тема Учет испарения при вероятностной оценке гидрологического режима рек Африки

закреплена приказом ректора Университета от «___» _____ 201__ года, № _____

2. Срок сдачи законченной работы «___» _____ 201__ года.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе:

— продолжительные ряды накопления за расходом воды на Африканских речных бассейнах;

— ряды суммарных за год осадков;

— ряды среднегодовой температуры воздуха;

4. Перечень вопросов, подлежащих разработке (краткое содержание работы (проекта):

— Введение. Актуальность темы, цели и задачи выпускной квалификационной работы.

— Глава 1. Методы долгосрочной оценки речного стока

(наименование главы)

— рассмотреть методы долгосрочной оценки речного стока

(содержание главы и ее разделов, параграфов)

— проанализировать результаты применения рассматриваемых методов к Российскому водосбору

(содержание главы и ее разделов, параграфов)

— сформулировать задачи исследования

(содержание главы и ее разделов, параграфов)

— Глава 2. Формирование базы данных

(наименование главы)

— создание базы данных расходов воды

(содержание главы и ее разделов, параграфов)

— создание базы данных метеорологических элементов (осадков, температуры)

(содержание главы и ее разделов, параграфов)

(содержание главы и ее разделов, параграфов)

— Глава 3. Ретроспективные прогнозы вероятностных характеристик годового стока Африки

(наименование главы)

— описание алгоритма ретроспективных прогнозов

(содержание главы и ее разделов, параграфов)

- прямые прогнозы
(содержание главы и ее разделов, параграфов)
- обратные прогнозы
(содержание главы и ее разделов, параграфов)
- Глава 4. Неустойчивость и фрактальная диагностика рядов годового стока рек Африки
(наименование главы)
- неустойчивость процесса формирования стока в Африке
(содержание главы и ее разделов, параграфов)
- фрактальная диагностика рядов речного стока Африки
(содержание главы и ее разделов, параграфов)
- Глава 5. Генерирование рядов испарения
(наименование главы)
- методы расчета испарения
(содержание главы и ее разделов, параграфов)
- статистическая обработка сгенерированных рядов испарения
(содержание главы и ее разделов, параграфов)
- Глава 6. Обеспеченные условные и безусловные расходы воды
(наименование главы)
- описание методов получения условных обеспеченных значений
(содержание главы и ее разделов, параграфов)
- получение условных и безусловных обеспеченных значений расходов воды
(содержание главы и ее разделов, параграфов)
- Заключение. Выводы по работе в целом. Оценка степени решения поставленных задач. Практические рекомендации.
- 5. Перечень материалов, представляемых к защите:
 - Пояснительная записка;
 - База данных Гидрометеорологическая база данных по бассейнам Африки ;
(наименование);
 - Методика Методика получения надежных значений обеспеченных расходов воды

6. Краткие итоги по работе с указанием относящихся к ним разделов работы.

- 6.1. доцент Гайдукова Екатерина Владимировна, глава № 2, 3, 4
(должность, фамилия, имя, отчество, глава № ...)
- 6.2. аспирант Бонгу Сорема Эрнесто, глава № 5, 6
(должность, фамилия, имя, отчество, глава № ...)

7. Дата выдачи задания: «17» 02 2016 года

Руководитель выпускной квалификационной работы:

Зав. каф. кафедры гидрофизики и гидропрогнозов, д.т.н.,
профессор Коваленко Виктор Васильевич
(должность, ученая степень, ученое звание, фамилия, имя, отчество)


(подпись)

Задание приня(а) к исполнению «17» 02 2016 года

Студент(ка) Синкеев Люсьен, МГ-2
(фамилия, имя, отчество, учебной группы)


(подпись)

ПРИЛОЖЕНИЕ М – Справки о внедрении

UNIVERSITE DES SCIENCES SOCIALES ET DE GESTION DE BAMAKO
FACULTE D'HISTOIRE ET DE GEOGRAPHIE
DER GEOGRAPHIE

« BKO », le 05-05-2017

CERTICAT

Délivré à Bongou Sotima Ernesto, étudiant en thèse à l'Université d'Etat d'Hydrométéorologique de Russie, pour soumettre au Conseil académique lors de la défense de sa thèse sur le sujet : « Les distributions probalistiques de l'écoulement et de l'évaporation annuels dans les bassins fluviaux de l'Afrique de l'Ouest ».

Un des résultats de la thèse de Bongou Sotima Ernesto est la méthodologie de l'obtention des distributions bidimensionnelles de la densité de probabilité de l'écoulement et de l'évaporation, adaptée aux conditions de l'Afrique de l'ouest. Cette méthodologie permet d'obtenir des distributions conditionnelles fiables de l'écoulement fluvial avec des caractéristiques calculées stables (norme et coefficient de variation). La méthodologie est pertinente pour le Mali, puisque c'est l'évaporation qui contribue beaucoup au bilan hydraulique des bassins fluviaux du Mali et qui doit être considérée dans les bassins de réception, où les installations hydrotechniques sont projetées ou déjà exploitées. Les résultats de Bongou S.E. sont considérés dans les travaux de recherche de l'Université avec la localisation supplémentaire pour les bassins fluviaux du Mali. De plus des cartes géographiques de l'Afrique de l'ouest pour l'écoulement et l'évaporation de probabilités 0,1%, 1%, et 10% pour les conditions climatiques réelles et projetées, obtenues du fait des variétés unidimensionnelles de la probabilité, présentent un intérêt particulier. Les cartes et les variétés unidimensionnelles sont montrées aux étudiants qui font leurs études dans la spécialité : l'hydrotechnique, afin de leur présenter la possibilité d'obtenir des caractéristiques statistiques fiables pour les installations hydrotechniques.

Professeur associé,
de la faculté de l'histoire et de la géographie,
Coordinateur Adjoint du Master Géo-GATE
Dr en sciences techniques

Diawara Hamidou



Председателю Ученого совета
по присуждению ученых степеней
(по месту защиты)

«УТВЕРЖДАЮ»
Первый проректор РГГМУ
Иванова И.И.

« 13 » сентября 2016 г.



СПРАВКА

Настоящая справка выдана Бонгу Сотима Эрнесто для предоставления в диссертационный совет по присуждению ученых степеней в качестве документа, подтверждающего внедрение результатов его диссертация «Вероятностные распределения многолетнего стока и испарения с территории речных бассейнов Западной Африки» по специальности 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

Бонгу С.Э. защитил магистерскую диссертацию в 2013 году по направлению «Гидрометеорология», с сентября 2013 года обучается в аспирантуре. В 2016 году работал на кафедре гидрофизики и гидропрогнозов в должности инженера-исследователя по теме «Адаптация математических моделей формирования вероятностных характеристик многолетних видов речного стока к физико-географическим условиям России для целей обеспечения устойчивости их решений при моделировании и прогнозировании» (№ государственной регистрации 01 2014 58678, грант Министерства образования и науки РФ). При выполнении НИР использовались материалы и результаты, полученные Бонгу С.Э. в ходе подготовки кандидатской диссертации: алгоритм автоматического построения эмпирических и теоретических двумерных плотностей вероятности (программа на языке высокого уровня); апробация разработанного алгоритма для районов с неустойчивым описанием процесса формирования речного стока.

Кроме того, результаты диссертации, связанные с методами объединения предметных областей стока и испарения, нашли отражение в учебном процессе при подготовке гидрологов (бакалавров и магистров) на гидрологическом факультете РГГМУ в следующих дисциплинах:

1. «Моделирование природных процессов»: раздел «Расширение фазового пространства моделей формирования речного стока» (направление подготовки: 05.04.05 – Прикладная гидрометеорология, профиль – Инженерная гидрология и рациональное использование водных ресурсов, квалификация (степень) – магистр).

2. «Численные методы математического моделирования»: раздел «Алгоритмы развития гидрологических процессов» (направление подготовки: 05.03.05 – Прикладная гидрометеорология, профиль – Прикладная гидрология, квалификация – бакалавр гидрометеорологии).

3. «Обеспечение устойчивости моделирования и прогнозирования речного стока методами частично инфинитной гидрологии»: раздел «Аттракторы процессов формирования многолетнего речного стока» (Направление подготовки 05.04.05 – Прикладная гидрометеорология, профиль – Инженерная гидрология и рациональное использование водных ресурсов, квалификация (степень) – магистр).

Декан гидрологического факультета,
к.т.н., доцент

Саковья В. М.

Председатель методической комиссии
гидрологического факультета, к.т.н., доцент

Викторова Н. В.

UNIVERSITE D'ABOMEY CALAVI

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

LABORATOIRE DE GEOLOGIE, MINES ET ENVIRONNEMENT

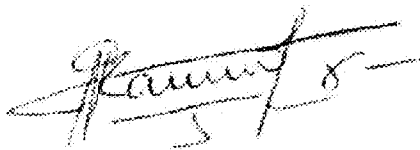
RAPPORT SUR LE MEMOIRE DE THESE DE BONGOU SOTIMA ERNESTO

Thème : *Les distributions probalistiques de l'écoulement et de l'évaporation annuels dans les bassins fluviaux de l'Afrique de l'Ouest*

Institution : Université d'Etat hydrométéorologique de Russie de Saint Pétersbourg

Le mémoire de thèse de BONGOU Sotima Ernesto présente la méthodologie d'obtention des distributions bidimensionnelles de la densité de probabilité de l'écoulement et de l'évaporation, adaptée aux conditions de l'Afrique de l'Ouest. Cette méthodologie permet d'obtenir des distributions conditionnelles fiables de l'écoulement fluvial avec des caractéristiques calculées stables (norme et coefficient de variation). La méthodologie est pertinente pour le Bénin, puisque c'est l'évaporation qui contribue beaucoup au bilan hydraulique des bassins fluviaux du Bénin et qui doit être considérée dans les bassins de réception, où les installations hydrotechniques sont projetées ou déjà exploitées. Les résultats de BONGOU S. Ernesto sont très appréciables comme travaux de recherches universitaires avec un intérêt supplémentaire pour les bassins fluviaux du Bénin. De plus des cartes géographiques de l'Afrique de l'Ouest pour l'écoulement et l'évaporation de probabilités 0,1%, 1%, et 10% dans les conditions climatiques réelles, obtenues du fait des variations unidimensionnelles de la probabilité, présentent un intérêt particulier. Les cartes et variations unidimensionnelles sont montrées aux étudiants de spécialité hydrotechnique, afin de leur présenter la possibilité d'obtenir des caractéristiques statistiques fiables pour les installations hydrotechniques.

Fait à Abomey-Calavi le 30/ 01/ 2019
Le Responsable du Laboratoire



Christophe KAKI