

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Соловьев Дмитрий Александрович

Должность: ректор ФГОУ ВО Вавиловский университет

Дата подписания: 27.03.2023 13:59:26

Уникальный программный ключ:

528682d78e671e566ab07f01fe1ba2172f735a12

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Саратовский государственный университет генетики,  
биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
по выполнению курсовой работы по дисциплине  
«Система координат и модели гравитационного поля Земли»**

**Редукции и аномалии поля силы тяжести**

Для студентов направления подготовки  
**21.04.03 Геодезия и дистанционное зондирование**  
профиль подготовки  
**Геодезия и дистанционное зондирование**

Саратов 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения и требования	3
2. Оформление курсовой работы	6
3. Содержание курсовой работы	8
4. Исходные данные и последовательность расчета	13
5. Рекомендованная литература	16
6. Приложения	19

## 1. Общие положения и требования

Методические рекомендации предназначены для подготовки обучающихся по направлению подготовки 21.04.03 «Геодезия и дистанционное зондирование» к выполнению курсовой работы по дисциплине «Система координат и модели гравитационного поля Земли». Курсовая работа служит формой текущего контроля подготовленности студента к профессиональной деятельности по образовательным программам как базового, так и повышенного уровней. Цель курсовой работы - систематизация и закрепление теоретических знаний обучающихся при решении практических задач исследовательского и аналитического характера, а также выявление его способности к самостоятельной работе. Этим обуславливается необходимость творческого, а не формального подхода к выбору тематики, выполнению содержательной части работы, написанию и оформлению курсовой работы. Курсовая работа - это комплексная самостоятельная исследовательская работа, в ходе которой студент решает конкретные практические задачи, соответствующие профилю деятельности и уровню образования, развивает практические и теоретические навыки. При этом используются знания, полученные по общепрофессиональным и специальным дисциплинам. Курсовая работа должна соответствовать следующим требованиям: - рассматривать проблему, не получившую достаточного освещения в литературе, либо новую постановку известной проблемы; - содержать элементы научного исследования актуальной темы; - иметь четкое построение и логическую последовательность в изложении материала; - выполняться с использованием экономико-математических методов и информационных технологий при проведении расчетов; - содержать убедительную аргументацию, достаточный иллюстративный материал; - завершаться доказательными выводами и обоснованными рекомендациями. В курсовой работе обучающийся должен показать умение работать с нормативными документами, инструктивным материалом, литературой и другими информационными источниками. Наряду с творческими вопросами,

которые отражаются в содержании курсовой работы, обучающийся должен уметь выполнять стандартные операции и знать порядок и форму представления курсовой работы. По содержанию курсовой работы и в процессе ее защиты устанавливаются: - уровень профессиональной и общеобразовательной подготовки обучающихся; - умение изучать, анализировать, обобщать информационные источники в соответствующей области знаний; - способность самостоятельно проводить научные исследования, систематизировать и обобщать фактический материал; - умение самостоятельно обосновывать выводы и практические рекомендации по результатам исследования. Курсовая работа направлена на формирование у обучающихся компетенций, представленных в табл. 1

Таблица 1

Код компетенции	Содержание компетенции (или ее части)	Индикаторы достижения компетенций
ПК-1	Способен проводить фундаментальные и прикладные научные исследования в сфере профессиональной деятельности, обобщать, анализировать и оформлять научные результаты.	ПК- 1.1 – Проводит исследования; ПК- 1. 2 – Обрабатывает и анализирует результаты исследований и научно-техническую информацию; ПК-1.3 – Руководит группой работников при проведении исследований ПК-1.4 – Повышает эффективность работ в области дистанционного зондирования, аэрофототопографии и фотограмметрии
ПК-3	Способен выполнять технологические операции по поддержке принятия решения на основе результатов космической деятельности	ПК- 3.1 – Выполняет технологические операции постановки задач; ПК- 3. 2 – Выполняет технологические операции по комплексной обработке данных; ПК-3.3 – Моделирует возможные варианты решений;

		<p>ПК-3.4 – Оценивает количественные и качественные показатели по результатам моделирования;</p> <p>ПК-3.5 - Определяет оптимальные варианты к поддержке принятия решения</p>
ПК-7	Способен разрабатывать и руководить внедрением проектных решений в сфере профессиональной деятельности	<p>ПК- 7.1 – Организует и управляет проектами производства наземной и аэрокосмической съемки;</p> <p>ПК- 7. 2 – Руководит персоналом подразделения;</p> <p>ПК- 7.3 – Разрабатывает методы и технологии повышения точности дистанционного зондирования и фотограмметрической обработки</p>

## 2. Оформление курсовой работы

Оформление курсовой работы должно быть выполнено на персональном компьютере в текстовом редакторе MS Word. При этом предъявляются следующие требования. Общий объем машинописного текста, без приложений должен составлять не менее 10 и не более 30 страниц. Страницы курсовой работы должны иметь поля, мм: левое – 25, верхнее – 20, правое – 10, нижнее – 20. Текст курсовой работы должен быть напечатан через полтора интервала шрифтом 14 пт Times New Roman на одной стороне стандартного листа белой односортовой бумаги формата А4 размером 210×297 мм (от 60 до 70 знаков в строке, считая промежутки между словами). Размер интервала должен быть единым для всей курсовой работы. Использование различных цветов допускается только для исполнения графических работ, а для основного текста используется только черный цвет. Все страницы курсовой работы, включая иллюстрации и приложения, нумеруются по порядку от титульного листа до последней страницы без пропусков, повторений, литерных добавлений. Первой страницей считается титульный лист (пример оформления титульного листа в приложении), на нем цифра «1» не ставится, цифра «2» проставляется на первой странице оглавления (содержания) и т.д. Порядковый номер печатается в середине нижнего поля страницы. Основная часть курсовой работы состоит из глав, разделов, подразделов (при необходимости). Номер заголовка отделяется от названия заголовка точкой и пробелом. Заголовки глав могут быть набраны жирным шрифтом. В конце заголовка точка не ставится. Заголовки располагаются по центру строк. Использование подчеркивания в заголовках не допускается. Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой. Заголовки должны разделяться между собой одной пустой строкой. Заголовок отделяется от последующего текста одной пустой строкой. Заголовок отделяется от предшествующего текста двумя пустыми строками. Каждую главу курсовой работы следует начинать с нового листа (страницы). Библиографический список структурируется по видам

использованных в работе источников: научная и учебная литература (монографии, учебники, научные статьи, диссертации, авторефераты диссертаций, комментарии и пр.).

Полностью готовая курсовая работа представляется студентом руководителю. В том случае, если представленная студентом курсовая работа соответствует все предъявляемым требованиям, то она допускается к защите.

### 3. Содержание курсовой работы

Редукция – методологический прием, заключающийся в приведении некоторых данных в удобный для их анализа или решения вид, приведении сложного к более простому.

**Цель работы:** Приобретение навыков расчета аномалий силы тяжести в редукции Буге для различных условий наблюдения.

**Задачи работы:** Для точек с известными координатами и абсолютными значениями силы тяжести рассчитать значения аномалий Буге.

#### Краткая теоретическая основа

Для геологической интерпретации представляют интерес не полные (абсолютные) значения поля силы тяжести  $g$ , а аномальные  $\Delta g_{ан.}$ , которые исключают влияние нормального поля силы тяжести  $\gamma_0$  и не зависят от высоты наблюдения  $h$  и окружающего рельефа. Введением соответствующих поправок вычисляются аномальные значения поля силы тяжести. Эта операция называется редуцированием или приведением силы тяжести. Применяют следующие поправки.

1) В первую очередь, при вычислении аномальных значений поля силы тяжести исключают нормальное поле силы тяжести. Нормальное поле силы тяжести  $\gamma_0$  – теоретически вычисляемая функция, наилучшим образом аппроксимирующая гравитационный эффект Земли.

В отечественной гравиметрии для расчета нормального поля  $\gamma_0$  принято использовать формулу Гельмерта:

$$\gamma_0 = 978016 (1 + 0,005302 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi) - 14 \text{ мГал} \quad (1)$$

$\varphi$  – широта точки наблюдения. Нормальное поле  $\gamma_0$  выражается в мГал.

Значения нормального поля силы тяжести  $\gamma_0$  относятся к точкам не на земной поверхности, а на поверхности уровня относимости (часто близок к уровню моря). В связи с этим при помощи дополнительных поправок

необходимо привести (редуцировать)  $\gamma_0$  к высоте точки гравиметрических наблюдений.

Для привязки к новой Потсдамской системе здесь введена поправка – 14 мГл. График нормальных значений, полученных по формуле Гельмерта, приведен на рис. 1. Для Саратова, где широта  $\varphi=51^\circ32'$  нормальное значение  $\gamma_0 = 981174,4$  мГл. По современным данным, полученным в результате изучения вариаций элементов орбит искусственных спутников, сжатие Земли  $\alpha$  также весьма близко к эллипсоиду Красовского и составляет  $1/298,25$ .



Рис. 1. График значений нормального поля, рассчитанных по формуле Гельмерта.

В качестве международной была принята формула Кассиниса:

$$\gamma_0 = 978031,8 (1 + 0,005024 \sin^2\varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi). \quad (2)$$

2) Для приведения нормального значения силы тяжести к точке наблюдения в предположении, что между этой точкой и уровнем моря нет притягивающих масс, вводится поправка за высоту точки наблюдения:

$$\delta g_{\text{выс}} = -(2\gamma_0/R)h = -0,3086 h \quad (3)$$

$h$  – высота точки наблюдения над уровнем относимости (в зависимости от положения может быть как положительной, так и отрицательной). Высота  $h$

выражается в метрах; поправка  $\delta g_{\text{выс}}$  – в мГал. Поправка за высоту учитывает вертикальный градиент поля силы тяжести вблизи поверхности Земли.

Введением поправок за нормальное поле и высоту рассчитываются аномалии поля силы тяжести в редукции свободный воздух (4):

$$\Delta g_{\text{св.в.}} = g_n - (\gamma_0 - 0.3086 h) \quad (4)$$

**Не рекомендуется** использовать термин аномалия силы тяжести в редукции Фая.

3) Влияние масс, расположенных между уровнем относимости и точкой наблюдений, учитывается введением поправки за промежуточный слой:

$$\delta g_{\text{пр.сл.}} = 2\pi G \sigma h = 0.0419 \sigma h \quad (5)$$

высота  $h$  выражается в метрах; плотность  $\sigma$  – в г/см<sup>3</sup>; поправка  $\delta g_{\text{выс}}$  – в мГал.

Для приведения нормального значения силы тяжести к точке наблюдения в случае, если между этой точкой и уровнем моря имеются притягивающие массы, к поправке за высоту добавляется поправка за промежуточный слой. Сумма этих двух поправок называется поправкой Буге.

Введением поправок за нормальное поле, высоту и промежуточный слой рассчитываются аномалии поля силы тяжести в редукции Буге:

$$\Delta g_{\text{буге}} = g_n - (\gamma_0 - 0.3086 h + 0.0419 \sigma h) \quad (6)$$

Формула (6) применяется для расчета аномалий силы тяжести в редукции Буге в случае наблюдений на земной поверхности.

4) При наблюдениях внутри масс для расчета аномалий силы тяжести в редукции свободный воздух и Буге необходимо учитывать гравитационный эффект масс, расположенных выше уровня наблюдения, которые уменьшают наблюдаемое значение поля силы тяжести. Для этого в наблюдаемые значения вводится дополнительная поправка за промежуточный слой  $0.0419 \sigma (\Delta H)$ , где  $\Delta H$  – мощность слоя между точкой наблюдения и земной поверхностью. Таким образом, при наблюдениях внутри масс:

$$\Delta g_{\text{св.в.}} = g_n + 0.0419 \sigma (\Delta H) - (\gamma_0 - 0.3086 h) \quad (7)$$

$$\Delta g_{\text{буге}} = g_n + 0.0419 \sigma (\Delta H) - (\gamma_0 - 0.3086 h + 0.0419 \sigma h) \quad (8)$$

5) В частном случае при наблюдениях внутри масс ниже уровня относимости ( $h < 0$ ) и при совпадении уровня относимости с земной поверхностью:  $\Delta H = h$ . При этом в формуле (8) оказываются численно равными два слагаемых, сумма которых называется поправкой за удвоенный промежуточный слой  $\delta g_{удв} = 2 * 0.0419 \sigma h$ , а формула для расчета аномалий Буге упрощается:

$$\Delta g_{буге} = g_n + 0.0419 \sigma h - (\gamma_0 - 0.3086 h + 0.0419 \sigma h) = g_n - \gamma_0 + (0.3086 h - 2 * 0.0419 \sigma h) \quad (9)$$

Внимание: во всех формулах (1)-(9) для высоты  $h$  – вертикальная ось направлена вверх.

В формуле (9) сумма (с учетом знака) поправок за высоту и удвоенный промежуточный слой называется поправкой Прея:  $\delta g_{прея} = 0.3086 h - 2 * 0.0419 \sigma h$ .

б) При изучении акваторий часто используются аномалии Буге, которые получают из аномалий в свободном воздухе, добавляя поправку за промежуточный слой, мощность которого равна глубине моря в точке наблюдения, а плотность равна разности между плотностью земной коры и морской воды. Таким образом, эта поправка «засыпает» океаны массами, доводя плотность воды до плотности земной коры. Тем самым сглаживается гравитационное влияние от границы вода-дно и в аномальном поле ярче проявляются эффекты глубинных структур.

Строго говоря, такая аномалия не является аномалией Буге, которая должна исключать действие расположенных выше геоида масс, представленных в виде плоского слоя. На океанах массы за поверхность геоида не выступают и, следовательно, поправка за промежуточный слой равна нулю, т.е. аномалии Буге на океанах совпадают с аномалиями в свободном воздухе. Поэтому аномалии Буге на акваториях можно называть так только условно.

Формулы для вычисления условных аномалий Буге имеют следующий вид:

- при наблюдениях на надводном судне (выше уровня моря)

$$\Delta g_{буге} = g_n - (\gamma_0 - 0.3086 h_n - 0.0419 (\sigma - 1,03) H) \quad (10)$$

- при наблюдениях ниже уровня моря

$$\Delta g_{\text{буге}} = g_n - (\gamma_0 + 0.222h - 0.0419(\sigma - 1,03)H) \quad (11)$$

- при измерениях на дне моря

$$\Delta g_{\text{буге}} = g_n - \gamma_0 - (0.265 - 0.0419\sigma)H \quad (12)$$

$h_{\text{п}}$  – высота прибора над уровнем моря;  $H$  – глубина моря (метры);  $h$  – глубина погружения; глубины  $h$  и  $H$  принимаются положительными;  $\sigma_{\text{воды}} = 1,03 \text{ г/см}^3$  – плотность морской воды;  $\sigma$  – плотность рельефообразующих дно пород (земной коры).

Формулы (10)-(12) получены из формулы (9) в результате подстановки известных значений.

Комбинация формул 1-12 позволяет рассчитать аномалии силы тяжести в редукции Буге для любых условий наблюдения.

Аномалии силы тяжести в редукции Буге при правильно подобранной плотности рельефообразующих пород не содержат гравитационных эффектов, связанных с различием высот точек наблюдения и поверхности относимости. В частности, для однородной по плотности горизонтально-слоистой среды значения аномалий Буге для любых условий наблюдений являются постоянной величиной.

**Аномалии силы тяжести в редукции Буге являются основными для качественной интерпретации гравитационного поля.**

#### 4. Исходные данные и последовательность расчета

1. Выбрать точку на Земле – место своего рождения и определяем для этой точки координаты: долготу, широту и высоту. *Если нужна высота точки, то её можно получить, воспользовавшись программой GoogleEarth или любой географической картой.*
2. Рассчитать нормальное значение поля силы тяжести в выбранной точке по формуле Гельмерта или Кассиниса. Уровень моря = уровень относимости = 0.
3. Выбрать в качестве наблюдаемого значения гравитационного поля отличающееся значение от нормального на величину, не превышающую  $\pm 100$  мГал.
4. Вычислить поправки и значения аномалий поля силы тяжести (редукции в свободном воздухе и Буге) для различных условий наблюдения. Плотность рельефообразующих пород выбрать по последней цифре студенческого билета из таблицы 2.

Таблица 2

Вариант	$\sigma$ – плотность рельефообразующих дно пород, г/см <sup>3</sup>
0	1,8
1	1,9
2	2,0
3	2,1
4	2,2
5	2,3
6	2,4
7	2,5
8	2,6
9	2,7

Плотность воды 1,03 г/см<sup>3</sup>, условия наблюдения представлены в таблице 3 и рисунках 2,3.

Таблица 3. Положение точки измерения приращения силы тяжести при различных условиях наблюдения.

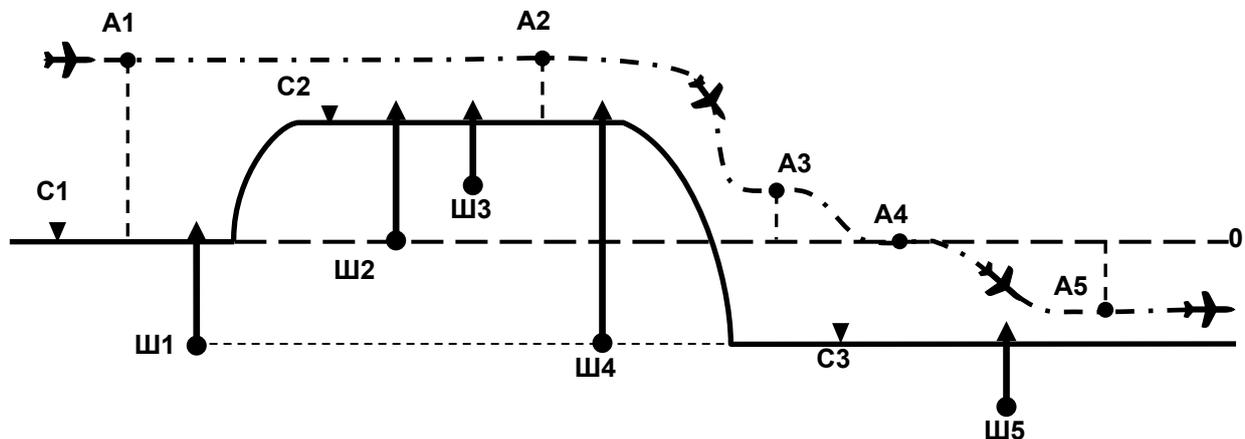
Номер	Обозначен ия для рис. 1, 2	Описание положения гравиметра (точки измерения)
<b><i>Сухопутная гравиметрия</i></b>		
1)	C1	на уровне моря
2)	C2	выше уровня моря на поверхности земли
3)	C3	ниже уровня моря на поверхности земли
<b><i>Аэрогравиметрия или штативные измерения</i></b>		
4)	A1	выше уровня моря в воздухе
5)	A2	выше уровня моря в воздухе, присутствует положительный рельеф
6)	A3	выше уровня моря в воздухе, уровень земли ниже уровня моря
7)	A4	на уровне моря, уровень земли ниже уровня моря
8)	A5	ниже уровня моря в воздухе
<b><i>Шахтная и скважинная гравиметрия</i></b>		
9)	Ш1	ниже уровня моря, рельеф отсутствует
10)	Ш2	на уровне моря в горе
11)	Ш3	выше уровня моря в горе
12)	Ш4	ниже уровня моря, присутствует положительный рельеф
13)	Ш5	ниже уровня моря в горе, рельеф ниже уровня моря
<b><i>Морская гравиметрия</i></b>		
14)	M1	на корабле, уровень наблюдения на уровне моря – гравиметр на уровне ватерлинии
15)	M2	на корабле, уровень наблюдения выше уровня моря – гравиметр на палубе
16)	M3	на подводной лодке, уровень наблюдения ниже уровня моря – гравиметр в водной толще
17)	M4	на дне – донный гравиметр

5. Сопроводить каждое вычисление поясняющим рисунком.

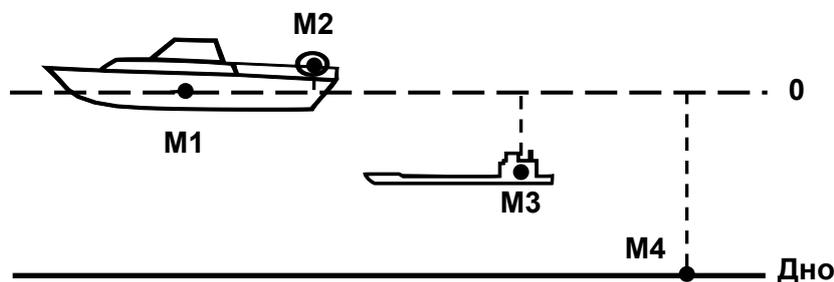
6. Для каждого профиля (рис. 2 и 3):

- построить графики рассчитанных поправок для вычисления аномалий силы тяжести в редукции свободный воздух и Буге;

- построить теоретический график аномалий силы тяжести в редукции Буге – график, который получается в случае реальных наблюдений и вычислений в условиях заданной модели;
- восстановить (вычислить значения) и построить графики аномалий силы тяжести в редукции за свободный воздух  $\Delta g_{св.в.}$  и наблюдаемых значений поля силы тяжести  $g$ , используя теоретический график аномалий силы тяжести в редукции Буге, графики поправок за промежуточный слой и высоту.
- рассчитать абсолютные значения поля силы тяжести  $g_{абс.}$  для каждого из условий наблюдений, которые в действительности должны быть для конкретной ситуации, и построить графики.



**Рис. 2.** Гравиметрический профиль, состоящий из комбинации сухопутных, воздушных и шахтных пунктов наблюдения. Условные обозначения см. в тексте.



**Рис. 3.** Гравиметрический профиль, состоящий из комбинации морских пунктов наблюдения. Условные обозначения см. в тексте.

## 5. Рекомендованная литература

1. Огородова Л.В. Методические указания к выполнению контрольной работы №1 по курсу Высшая геодезия и основы координатновременных систем. — М.: МИИГАиК, 2017.
2. Огородова Л.В. Высшая геодезия. Часть III. Теоретическая геодезия: Учебник для вузов. — М.: Геодезкартиздат, 2006. — 384 с.
3. Огородова Л.В. Основы теории потенциала. Гравитационное поле Земли, Луны и планет: Учебное пособие. — М.: Изд-во МИИГАиК, 2013. — 108 с.
4. Огородова Л.В. Нормальное поле. Определение нормального потенциала (текст лекций по геодезической гравиметрии и теории фигуры Земли): Учебное пособие. — М.: Изд-во МИИГАиК, 2010. — 105 с.
5. Бойко Е.Г. Высшая геодезия. Часть II. Сфероидическая геодезия: Учебник для вузов. — М.: Картгеоцентр – Геодезиздат, 2003. — 144 с.
6. Морозов В.П. Курс Сфероидической геодезии: Учебник. — М.: Недра, 1979 — 289 с.
7. Гофман-Валленгоф Б., Моритц Г. Физическая геодезия. — М.: Изд-во МИИГАиК, 2007.
8. Яковлев Н.В. и др. Практикум по высшей геодезии. Изд. 2-е, стереотипное. — М.: ООО ИД «Альянс», 2007. — 368 с.
9. ГКИНП (ГНТА) – 01 – 006 – 03 Основные положения о государственной геодезической сети Российской Федерации.
10. ГКИНП (ГНТА) – 03 – 010 – 02 Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов.
11. Инструкция о построении ГГС. — М.: Недра, 1966.
12. Яковлев Н.В. Высшая геодезия. — М.: Недра – Геодезиздат, 1989. — 445 с.
13. Огородова Л.В., Шилкин П.А. Определение геодезических координат из пространственной линейной засечки: Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу высшей геодезии. — М.: МИИГАиК, 2015. — 20 с.

14. Кашин Л.А. Построение классической астрономо-геодезической сети России и СССР. — М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 1999. — 192 с.

## **6. Приложение**

Образец титульного листа курсовой работы  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Саратовский государственный университет генетики,  
биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова»

Кафедра «Общеобразовательные дисциплины»

# **Курсовая работа**

**Тема: Редукции и аномалии поля силы тяжести**

Выполнил:  
обучающийся 2 курса  
агрономического факультета  
Группы М-ГиДЗ-201  
Иванов И.И.

Саратов 2023