

Вертикальные профили градиента электрического потенциала в различно стратифицированном приземном слое атмосферы

Петрова Г.Г.

Состояние проблемы

На современном этапе исследований электричества атмосферы общепризнанным может считаться влияние турбулентности атмосферы на электрические процессы в приземном слое. Как теоретические, так и экспериментальные исследования показывают, что турбулентность, интенсивность которой, как известно, определяет температурная устойчивость слоя и скорость воздушных потоков в нем, в значительной мере формирует структуру электродного слоя [1-9].

Необходимость отдельного описания структуры электродного слоя для устойчивой и неустойчивой стратификации температуры приземного слоя по данным исследований особенно очевидна, если почва в пункте наблюдений заметно эманурует [4,10,11]. Возникающий в этих условиях вертикальный градиент электропроводности влияет на процессы образования объемного заряда. Поскольку формирующийся вблизи земли объемный заряд обуславливает профиль градиента потенциала в электродном слое, то в типичных условиях можно ожидать появления определенного его профиля.

Целью исследования, таким образом, явилась типизация вертикального распределения градиента потенциала в приземном слое с учетом его температурной стратификации, метеорологических условий наблюдений и содержания радона в почве и воздухе пункта наблюдений.

Методы измерений и представления результатов

Подробно методы определения характеристик атмосферы и описание пунктов наблюдений приведены в работе [12], помещенной в данном сборнике, поэтому здесь приводится только список обсуждаемых в работе величин, непосредственно измеряемых и определяемых расчетным путем.

Измеряются непосредственно:

- Удельные полярные электропроводности атмосферы - прибор Гердиена системы Литвинова (высоты 0,05; 0,3; 0,6; 1; 2; 3 м)
- потенциал атмосферы - радиоактивный иониевый коллектор (0,5; 1; 2; 3 м)
- напряженность поля - флюксметр «Поле-2» (вблизи земной поверхности)
- температура воздуха - психрометр Ассмана (0,5; 2 м)
- скорость ветра - чашечный анемометр (0,5; 2 м)
- концентрация радона-222 - радонметр «AlphaGUARD»

Рассчитываются косвенно:

- градиент потенциала, средний для слоев 0-0,5; 0,5-1; 0-1; 1-2; 2-3 м
- плотность объемного заряда легких ионов (по данным об удельных полярных электропроводностях)
- плотность объемного заряда ионов всех групп (по данным коллекторной установки о вертикальном распределении потенциала)
- градиент температуры воздуха в слое 0,5-2 м: $(t_{2,0}-t_{0,5})/1,5$
- коэффициент турбулентности (по методу Орленко)

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Для выявления основных типов вертикального профиля электрического поля вблизи земли на основании результатов измерений летом 1997 г. в пункте Михайловка (Кашарский район Ростовской области) по данным флюксметра и коллекторной установки были построены 113 ежечасных профилей градиента потенциала поля в слое 0-3 метра. Каждый профиль строился по 4 точкам: значение поля на уровне земли определялось по данным флюксметра; значения, условно отнесенные к средним для каждого слоя уровням 0,5; 1,5; 2,5 метра, получены в соответствии с методикой определения градиента потенциала - среднего для соответствующего слоя - на основании данных коллекторной установки по значениям потенциала на высотах 1, 2 и 3 метра [13]. Схема подсчета градиента потенциала приведена в разделе «Измерение вертикальной

составляющей градиента потенциала электрического поля атмосферы» статьи [12] об используемом измерительном комплексе, помещенной в настоящем сборнике.

На рис.1 представлены кривые профилей градиента потенциала, осредненные для каждого из 8 возможных типов (условно обозначенные буквами от а до ж).

Для каждого часа на основании данных градиентных измерений температуры воздуха и скорости ветра в нижнем 5-метровом слое были рассчитаны значения параметра стратификации m . Как известно из теории, $m=1$ соответствует нейтральной стратификации приземного слоя, $m>1$ неустойчивой и $m<1$ - устойчивой стратификации. На практике нет резкой границы между этими тремя состояниями. Поэтому в группу замеров с устойчивой стратификацией отбирались те, для которых $m<0,7$, а в группу с неустойчивой - те, для которых $m>1,3$, чтобы не привлекать в эти группы случаи нейтральной стратификации, для которой m имеет значения вблизи 1.

Следует отметить, что устойчивая стратификация нижнего слоя атмосферы в донских степях в летнее время наблюдается обычно в ночные часы при малой скорости ветра, неустойчивая - днем при развитой конвекции и заметном ветре. Что касается коэффициента турбулентности, то по результатам наблюдений осредненный для устойчивой атмосферы (замеры при параметре стратификации $m<0,7$) коэффициент турбулентности в пунктах Ростовской области составляет 0,00–0,01 м²/с, в то время, как для неустойчивой стратификации (при $m>1,3$) он лежит вблизи пределов 0,05-0,10 м²/с.

При систематизации профилей обнаружено, что для периодов с устойчивой стратификацией атмосферы (44 часа замеров) в 90% случаев (39 замеров) реализуется определенный тип профиля поля, в котором в пределах 3-метрового слоя убывание градиента потенциала по высоте в нижней части профиля сменяется затем ростом: профили типа а, б, в, ж на рисунке 1.

Из уравнения Пуассона, приняв во внимание, что $\vec{E} = -\vec{G}$, где \vec{E} - напряженность электрического поля, $\vec{G} = grad\varphi$ - градиент электрического

потенциала, получим $\operatorname{div}G = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$. Здесь ρ - плотность объемного заряда, ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума.

С учетом того, что в атмосфере проекция вектора градиента потенциала \vec{G} глобального электрического поля на вертикальную ось, направленную вверх, как известно, положительна, становится очевидно, что уменьшению градиента по высоте следует сопоставить положительный объемный заряд в слое, а увеличению - отрицательный. Из этих рассуждений ясно, что описываемому профилю поля соответствует положительный объёмный заряд вблизи земли в слое толщиной около полуметра и располагающийся над ним отрицательный заряд.

По данным наблюдений описанная двухслойная структура с положительным зарядом вблизи земли: (условно профиль типа I) наблюдалась в 70 % случаев (27 замеров а,б,в типов), а в 30 % (12 часовых серий измерений ж-типа) вертикальное распределение поля в пределах исследуемого 3-метрового слоя обнаруживало трехслойную структуру объемного заряда: положительный, отрицательный и снова положительный заряд, - в дальнейшем профиль типа II (рис.2). (Планками на всех рисунках показаны значения стандартной погрешности.)

Характеристики состояния нижнего слоя атмосферы, осредненные для рассматриваемого периода, даны в таблице 1 (с указанием высоты расположения датчиков). Как видно из таблицы, профили как типа I, так и типа II реализуются преимущественно в условиях ночных температур с приземной инверсией температуры воздуха, практически при отсутствии ветра, при слабом турбулентном обмене и заметном содержании радона в атмосферном воздухе вблизи земной поверхности. При этом профиль типа II наблюдается в ситуации особенно глубокой инверсии температуры практически при полном отсутствии ветра и турбулентного перемешивания. Это наводит на мысль о том, что оба профиля имеют трехслойную структуру, но различаются масштабом по вертикали: профиль II в силу полного отсутствия обмена сжат по вертикали, а профиль I более растянут и выходит за пределы изучаемого слоя.

Представленные на рис.3 результаты идентичных измерений, проведенных десять лет спустя в ином пункте Кашарского района - Талловеров - в сравнении с обсуждаемыми данными по Михайловке могут служить косвенным подтверждением той мысли, что поле в приземном слое в условиях устойчивой стратификации при заметном эманировании почвы имеет трехслойный Z-образный вертикальный профиль, который сжимается или вытягивается по вертикали в зависимости от глубины инверсии температуры. Судя по рисунку, область отрицательного заряда в Талловерове расположена ниже, чем в Михайловке, но профиль имеет ту же Z-образную форму, что и профиль типа II в Михайловке. Как видно из таблицы 1, где помещены характеризующие условия измерений параметры, обсуждаемый профиль действительно получен при глубокой температурной инверсии, нулевом значении коэффициента турбулентности и значительном содержании радона вблизи земли.

Наблюдающиеся закономерности вертикального распределения градиента потенциала вблизи земли при отсутствии или заметном ослаблении турбулентного перемешивания можно интерпретировать, учитывая, что одной из причин образования слоя объемного заряда в атмосфере может быть дивергенция вертикального тока проводимости, связанная с градиентом удельной электропроводности в этом слое [14]. По экспериментальным данным при слабом обмене в некотором слое, расположенном, как правило, выше 0,3÷0,5 м, при наличии эксхалации радона наблюдается заметный отрицательный градиент электропроводности [6-8] и, соответственно, накапливается отрицательный объемный заряд легких ионов, частично или полностью компенсирующий положительный объемный заряд электродного эффекта в этом слое.

Далее, в отдельную совокупность были выделены профили поля, которые характеризуются ростом градиента потенциала с высотой вблизи земной поверхности и последующим уменьшением их по вертикали: профили типа г, д, е, з на рис.1 (35 часовых серий измерений). Оказалось, что такое распределение градиента потенциала по высоте чаще (в 60%) наблюдается при неустойчивой стратификации атмосферы, чем при других. Половина из остальных 40% получены в дневные часы при нейтральной стратификации, когда движения

атмосферы имеют место и наблюдается заметная турбулентность: среднее значение коэффициента турбулентности $0,05 \text{ м}^2/\text{с}$.

На рисунке 2в помещен профиль градиента потенциала, осредненный для группы профилей указанных типов, полученных для условий неустойчивой стратификации приземной атмосферы. Эти условия в Ростовской области реализуются в летние месяцы в дневные часы с ветром и характеризуются развитой турбулентностью (таблица 1).

Отрицательный объемный заряд в нижней части 3-метрового слоя, устойчиво фиксирующийся в эти часы на основании данных о вертикальном распределении градиента потенциала, обусловлен, возможно, наэлектризованной пылью, поднимаемой с иссушенной земной поверхности ветровыми потоками. Косвенно на правомерность такого предположения указывает тот факт, что при регистрации напряженности поля флюксметром неоднократно наблюдалось снижение поля на уровне земли и частые переходы в область отрицательных значений при подъеме пыли машинами на проселочной дороге вблизи точки наблюдений. Фрагмент такой записи представлен на рисунке 4. Важно отметить, что снижение поля вблизи земли при наблюдениях в Ростовской области неизменно отмечается при любых помутнениях атмосферы: запылении, задымлении, наличии дымки и т.п.

На рис.5, наряду с наблюдавшимися нами в условиях устойчивой и неустойчивой стратификации атмосферы профилями, представлены вертикальные распределения, полученные экспериментальным путем Крозье [3] в безветренные ночи и в дневные часы с ветром и в результате модельных расчетов для нетурбулентного и турбулентного случая Хоппелем [1]. Как видим, имеет место вполне удовлетворительное согласие результатов разных авторов для устойчивой стратификации и отсутствия турбулентности для типа профиля I.

При неустойчивой стратификации выше полуметрового слоя во всех случаях, как видно, имеет место уменьшение градиента потенциала с высотой вследствие положительного объемного заряда электродного эффекта. Обращает на себя внимание то, что в целом по слою у всех авторов для этих условий значения поля выше, чем в нетурбулентном случае при устойчивой

стратификации, когда в приземном слое образуется слой отрицательного объемного заряда.

Особенности распределения поля в нижней части профиля в условиях Ростовской области связаны, по-видимому, с особенностями аэрозольного режима территории, как обсуждалось ранее. Как показывают исследования, влияние скорости ветровых потоков и интенсивности турбулентного перемешивания на электрическое поле атмосферы опосредовано и связано с их влиянием на распределение объемного заряда [3], а также с переносом заряженных частиц аэрозоля (пыль, дым, снег и т.п.) [15]. Уточнение этого вопроса требует проведения дополнительных экспериментальных исследований с осуществлением контроля концентрации аэрозоля в нижнем слое атмосферы.

Выводы

Турбулентная диффузия, интенсивность которой изменяется в значительных пределах, вносит свои коррективы в пространственное распределение электрических характеристик приземного слоя атмосферы. Многофакторность процессов усложняет их описание и интерпретацию экспериментальных данных. Поэтому при экспериментальных исследованиях электричества приземной атмосферы важны обоснованная систематизация материала, отбор однородных массивов данных. Опыт исследований многих авторов показывает, что крайне важно при систематизации экспериментальных данных по приземному слою учитывать термодинамическую устойчивость нижних слоев атмосферы, которая определяет интенсивность вертикального обмена и развитость турбулентных движений вблизи земли.

Литература

1. *Hoppel W.A.* Electrode effect: comparison of theory and measurement. // In: *Planetary Electrodynamics*, 2.S.C.Coroniti and J.Hughes; editors: Gordon and Breach Science Publishers, New-York. 1969. P.167-181.

2. *Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М.* Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог, 1998.
3. *Crozier W.D.* Atmospheric electrical profiles below three meters. // *J.Geoph.Res.* 1965. 70. P.2785-2792.
4. *Israelsson S.* On the conception "Fair weather condition" in atmospheric electricity. // *Pure Appl.Geophys.* 1978. V.116. P.149-158.
5. *Law J.* The ionization of the atmosphere near the ground in fair weather. // *Quart.J.R.Met.Soc.* 1963. 89. P.107-121.
6. *Petrov A.I., Petrova G.G., and Panchishkina I.N.* On factors determining the variations of the electric characteristics of a surface layer. // *Proc.11th Int. Conf. Atm. Electricity.* Alabama, USA. 1999. P. 547-550.
7. *Petrov A.I., Petrova G.G., and Panchishkina I.N.* Measurements of polar conductivities in the surface layer of the atmosphere.// *Proc.10th Int. Conf. Atm. Electricity.* Osaka, Japan. 1996. P.188-191.
8. *Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Клово А.Г.* Электропроводность воздуха и концентрация радона в приземном слое. // *Труды V Российской конференции по атмосферному электричеству.* Владимир, ВлГУ. 2003. Т.1. С.124-127.
9. *Анисимов С.В., Шихова Н.М., Мареев Е.А., Шаталина М.В.* Структуры и спектры турбулентных пульсаций аэроэлектрического поля. // *Изв.РАН, Физика атмосферы и океана.* 2003. Т. 39, № 6. С.765-780
10. *Israelsson S., Knudsen E., and Ungethüm E.* Natural radioactivity in soil gas and exhalation of natural radioactivity from the ground surface. // *Marsta observatory, Uppsala, reports №30.* 1972. 28 p.
11. *Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Кудринская Т.В.* Физико-статистический анализ атмосферно-электрических характеристик приземного слоя. // *Труды НИЦ ДЗА (Филиал ГГО).* 2006. Вып. 7. С. 182-190.
12. *Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Кудринская Т.В., Петров Н.А.* Измерительный комплекс для исследования электричества приземного слоя атмосферы // (В настоящем сборнике)

13. *Имянитов И.М.* Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. М.1957.
14. *Чалмерс Дж.А.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат. 1974.
15. *Лободин Т.В.* О роли локальной компоненты в глобальных суточных вариациях электрического поля атмосферы. // Труды ГГО. 1980. Вып.401. С.108-114.

Таблица 1. Характеристики нижнего слоя атмосферы, осредненные для периодов измерений с устойчивой и неустойчивой стратификацией температуры

Величина	Высота, м	Михайловка, 1997 г.			Талловеров, 2008 г.
		Устойчивая стратификация		Неустойчивая стратификация	Устойчивая стратификация
		I	II		
Температура воздуха °С	2,0	11,6	7,7	22,8	18,3
Градиент температуры °С/м	0,5-2,0	0,4	1,0	-0,1	0,7
Скорость ветра м/с	0,5	0,2	0,0	1,9	0,1
	2,0	0,4	0,1	2,5	0,2
Коеф. турбулентности м ² /с	0,5-2,0	0,01	0,00	0,08	0,00
Концентр. радона-222 Бк/м ³	0,05	47	60	9	80
<i>Число случаев</i>	-	27	12	20	67

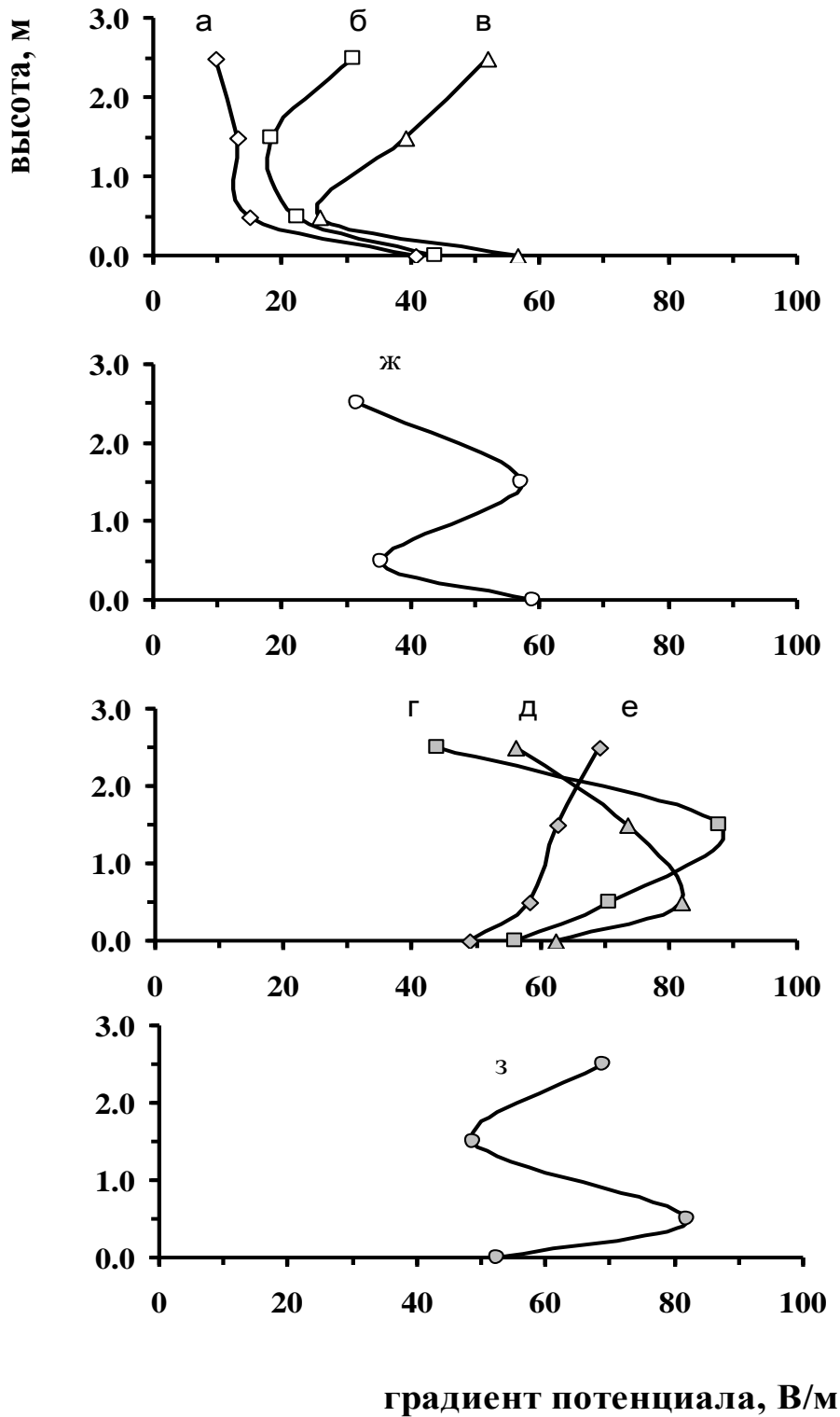


Рисунок 1. Все типы профилей градиента потенциала, наблюдавшиеся в Михайловке Кашарского района в августе 1997 года в общем из 113 часов наблюдений на протяжении: а-9 часов; б-19 часов; в-23 часа; г-4 часа; д-14 часов; е-4 часа; ж-27 часов; з-13 часов.

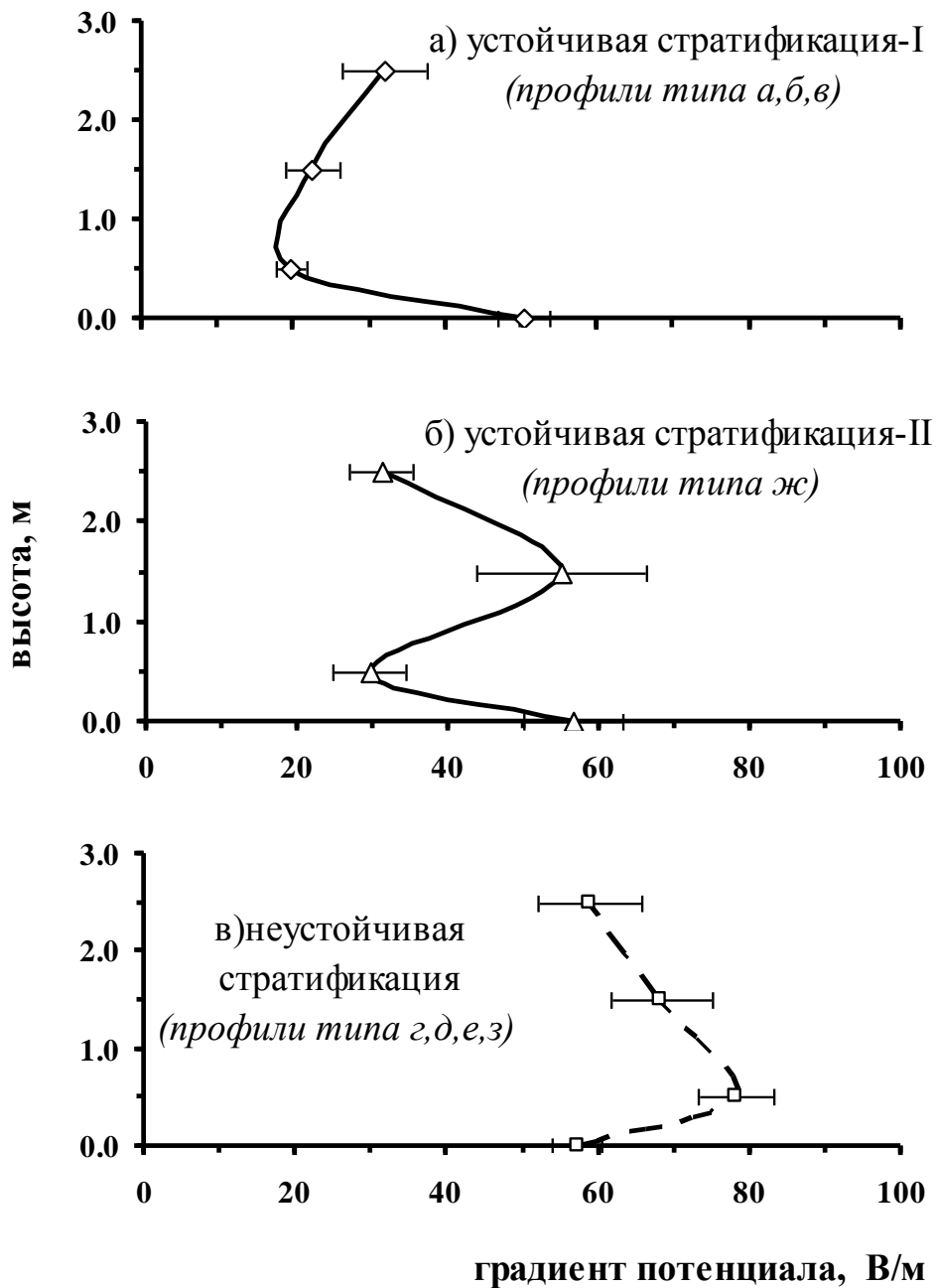


Рисунок 2. Типы вертикальных профилей градиента электрического потенциала, осредненные для периодов измерений с различной температурной стратификацией нижнего слоя атмосферы. Михайловка Кашарского района, август 1997 года: а) 27 часов; б) 12 часов; в) 20 часов замеров.



Рисунок 3. Вертикальный профиль градиента потенциала, осредненный для периодов измерений с устойчивой температурной стратификацией нижнего слоя атмосферы в Талловерово Кашарского района, август 2008 года (67 часов)

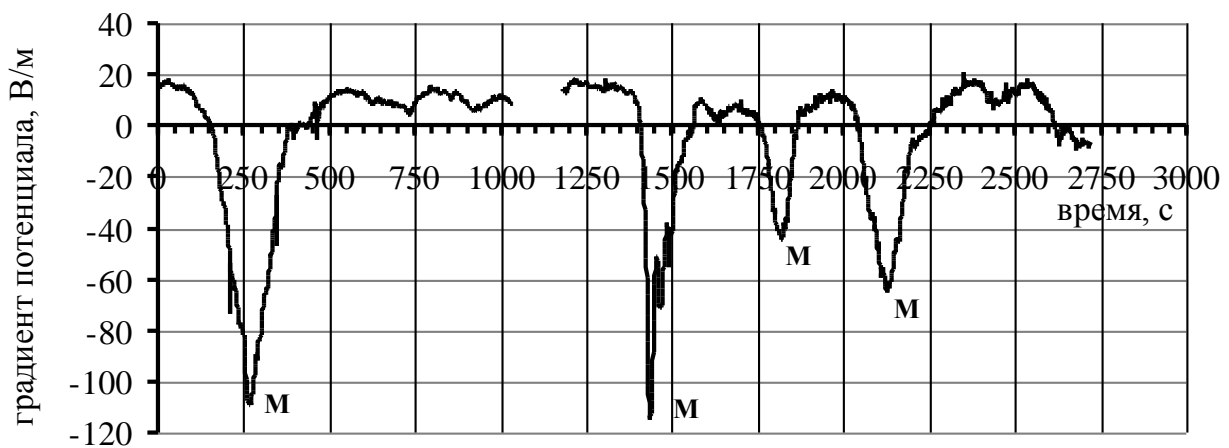


Рисунок 4. Пример записи градиента потенциала, измеренного флюксометром «Поле-2» на уровне земли в пункте Талловеров Кашарского района 12.08.07 (15-16 часов) в период работы на окрестных полях сельхозтехники. Литерой «М» обозначены характерные всплески поля, вызванные подъемом пыли машинами, проходящими по грунтовой дороге в десятках метров от площадки.

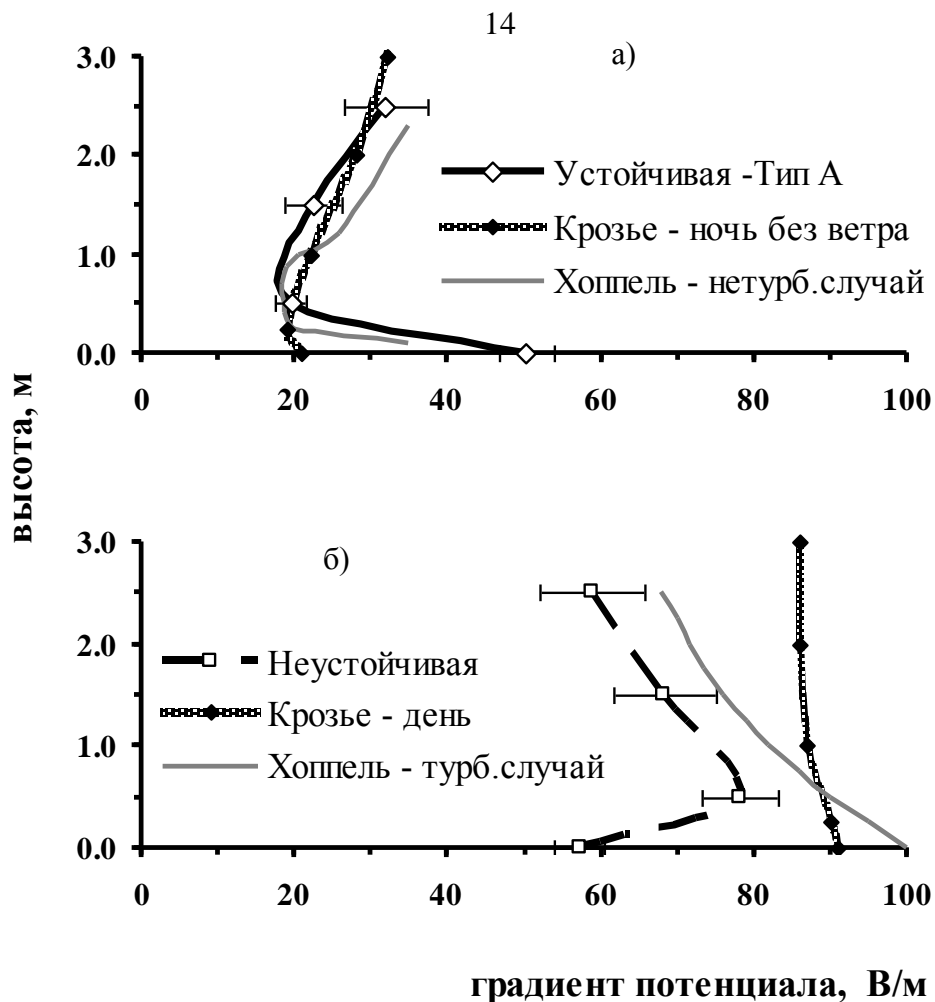


Рисунок 5. Сравнительные результаты экспериментальных определений и теоретических расчетов вертикальных профилей градиента электрического потенциала:

а) типичный профиль поля в Михайловке при устойчивой стратификации, профиль поля, полученный экспериментально Crozier [3] в ночные часы без ветра и профиль поля, рассчитанный Норреп [1] для нетурбулентного случая;

б) типичный профиль поля в Михайловке при неустойчивой стратификации, профиль поля, полученный экспериментально Crozier [3] в дневные часы с ветром и профиль поля, рассчитанный Норреп [1] для турбулентного случая.