

## К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ ОТ РАЗНООБРАЗНЫХ ИСТОЧНИКОВ



О.В. Воронов



В.В. Быкадоров

Представлен анализ закономерностей расчета рассеяния загрязняющих примесей в пограничном слое атмосферы с учетом особенностей их пространственно-временного распределения и физико-математическое моделирование процессов диффузии загрязняющих примесей антропогенного происхождения.

*Ключевые слова:* пограничный слой атмосферы, метрологические (аэрологические) измерения или метрологический прогноз

**Ж**елезные дороги, наряду с положительным влиянием на развитие экономики тех регионов, где они строились, наносят непоправимый ущерб экологии [14;20]. Негативное влияние железнодорожного транспорта проявляется, главным образом, через загрязнение водных источников, почвы и растительности вредными веществами.

Важное значение с точки зрения метеорологических аспектов загрязнения атмосферы имеют исследования закономерностей распространения атмосферных примесей и особенностей их пространственно-временного распределения, так как они являются основой для объективной оценки состояния и тенденции изменений загрязнения воздушного бассейна, а также разработки возможных мероприятий по обеспечению чистоты атмосферы. С исследованиями связано определение репрезентативных мест и времени наблюде-

ний в целях создания систем контроля за чистотой воздуха, разработки стратегии ограничения и регулирования выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Моделирование вышеперечисленных процессов в настоящее время выполняется на основе расчетов программных комплексов, включающих в себя модели атмосферы [8–12;17–19;21;22], Мирового океана, подстилающей поверхности [1;9;16], морского льда и ряда других [3]. Каждый компонент совместной модели при этом должен правильно воспроизводить физику процессов соответствующей среды в условиях, когда другие компоненты заменяются данными реанализа.

В этой связи наряду с проведением экспериментальных исследований условий распространения загрязняющих веществ в атмосфере и выявления закономерностей их пространственно-временного

**Воронов Олег Викторович**, кандидат технических наук, магистрант кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Луганского национального университета имени Владимира Даля. Область научных интересов: экологическая безопасность на транспорте, в транспортном строительстве. Автор 32 научных работ.

**Быкадоров Вадим Викторович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой железнодорожного транспорта Луганского национального университета имени Владимира Даля. Область научных интересов: силовые установки транспортных средств. Автор 87 научных работ, в том числе трех монографий. Имеет 32 патента на изобретения.

**Тишук Людмила Ивановна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Социально-гуманитарные, естественно-научные и общепрофессиональные дисциплины» филиала Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС) в г. Воронеж. Область научных интересов: обработка металлов давлением и неразрушающий контроль. Автор 43 научных работ.

**Иванова Елена Ивановна**, ассистент кафедры железнодорожного транспорта Луганского национального университета имени Владимира Даля. Область научных интересов: подвижной состав железных дорог. Автор восьми научных работ.

распределения [2], важную роль играет физико–математическое моделирование процессов диффузии загрязняющих примесей как в приземном [1;4;9;15], так и в пограничном слое атмосферы (ПСА) (например, применение находящегося в свободном доступе программного комплекса FlexPart (<http://transport.nilu.no/flexpart>), разработанного Норвежским институтом исследования атмосферы [18], выявление профилей ветра и температуры в пограничном слое с помощью комплексных моделей WRF–ARW (Weather Reserarch Forecast – прогноз и исследование погоды, США) [19;23], Enviro–HIRLAM, GEM–MACH [11], НОСТРАДАМУС, FLEXPART–WRF, HYSPLIT [17].

В разных конкретных задачах для расчета диффузии примеси требуются различные метеорологические величины. Существует несколько способов описания диффузии примеси в турбулентной среде, один из которых основан на рассмотрении турбулентности в переменных Лагранжа [1;9;17], другой способ основан на обобщении уравнения молекулярной диффузии [4–7;9], что приводит к так называемому полуэмпирическому уравнению диффузии. Эти задачи могут быть классифицированы на основе представлений о путях распространения примеси: она поступает от источника, переносится и рассеивается в ПСА, где может претерпевать дополнительные изменения (вступать в реакции, распадаться, выходить за пределы пограничного слоя в тропосферу или на подстилающую поверхность). Источник примеси может быть точечным [5–7], линейным или пространственным [17], мгновенным, длительно действующим или непрерывным [10;12].

Поведение облака или струи (факела) примеси определяется ее переносом и диффузией во внешней среде [16]. Важнейшим параметром переноса примеси является поле вектора скорости ветра  $V_i$ . Рассеяние в зависимости от модели диффузии рассчитывается через коэффициенты диффузии  $k_i(z)$  или же непосредственно через дисперсии координат частиц примеси относительно фиксированного начала  $\sigma_i$  и относительно центра тяжести облака  $\eta_i$  (здесь  $i=1, 2, 3$  соответствует горизонтальным координатам  $x, y$  и вертикальной  $z$ ). Наибольшую трудность вызывает определение характеристик рассеяния  $k_i, \sigma_i, \eta_i$ . В настоящее время эти параметры, как правило, задаются априорно, на основе обобщенных результатов диффузионных экспериментов [9;11;13]. При этом допускаются определенные погрешности, т.к. полученные результаты в какой-то мере носят локальный характер. Физически правильнее было бы выражать эти характеристики через параметры ПСА. При этом, однако, возникает ряд проблем, одной из которых является определение параметров пограничного слоя

из доступной метеорологической, аэрологической и синоптической информации, учет их временной и особенно пространственной изменчивости.

Для каждой переменной и каждого параметра должно быть точно указано время осреднения (время отбора или измерения). Поскольку атмосфера содержит вихри в широком диапазоне масштабов, при решении каждой конкретной задачи важно подобрать подходящее осреднение.

Все перечисленные выше переменные и параметры являются эйлеровыми характеристиками, т.е. они измеряются с помощью приборов, которые либо закреплены неподвижно, либо движутся в воздухе с постоянной скоростью (например, находясь в самолете). Однако диффузия – это лагранжев процесс, в котором воздействие атмосферы проявляется в результате безынерционного движения частиц, следующих за воздушным потоком. Таким образом, основная задача состоит в установлении связей между перечисленными выше эйлеровыми переменными и соответствующими лагранжевыми переменными. Обычно используется предположение о том, что в эйлеровой и лагранжевой системах отсчета все переменные являются одинаковыми с точностью до выбора временных масштабов (например, в этих системах равны энергии турбулентности).

В результате соотношение между характеристиками диффузии к турбулентности зависит от времени отбора проб, времени пролета и времени работы источника диффундирующей примеси.

В настоящее время наиболее широкое распространение на практике получили: статистические модели [8], гауссовы модели [16], К-теория диффузии, модели теории подобия и трехмерная стохастическая (Монте-Карло) модель лагранжевых траекторий [17].

Связи между искомым полем концентрации примеси и метеорологической информацией через модели диффузии и модели пограничного слоя в общем виде показаны на рис. 1. Под исходными данными здесь понимаются результаты обычных метеорологических и аэрологических измерений (в случае диагностического расчета диффузии примеси) или же прогнозируемые метеорологические элементы по картам погоды. В обоих случаях, но с разной степенью точности, они позволяют определить входные параметры, необходимые для применения той или иной модели ПСА. Выходные параметры модели позволяют в свою очередь определить входные параметры модели диффузии, зависящие от состояния атмосферы.

Остановимся, прежде всего, на переходе от выходных параметров модели ПСА к входным параметрам модели диффузии. Только один из них – профиль скорости ветра используется непосредственно.

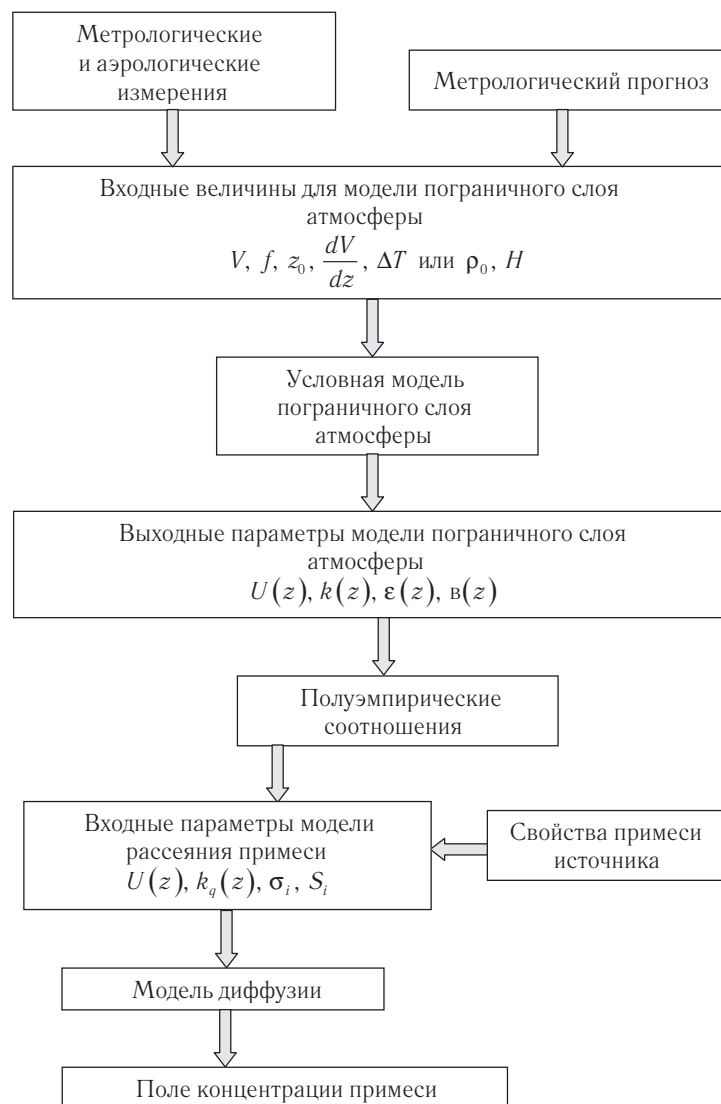


Рис. 1. Схема расчета рассеяния примеси по метеорологической информации

Что касается вертикальной составляющей коэффициента турбулентной диффузии, то из-за недостатка как теоретических, так и экспериментальных данных на практике [2;15], он отождествляется с коэффициентом турбулентного обмена количеством движения или тепла, отношение между которыми также изучено недостаточно [10–13]. При малых временах диффузии вводятся соответствующие поправки.

В случае длительного действующего точечного источника для расчета рассеяния примеси необходимо знать дисперсию частиц в поперечном ветру направлении  $\sigma_y$ , как функцию времени диффузии или расстояния до источника  $x$ . Для расчета рассеяния облака примеси от мгновенного источника нужны аналогичные характеристики по всем трем направ-

лениям координат. Эти характеристики в настоящий момент не выражаются прямо через выходные параметры моделей ПСА [19;21].

Обычно их связи с характеристиками устойчивости атмосферы и скорости ветра определяются на основе эмпирических соотношений, полученных по результатам диффузионных опытов в атмосфере [9–11]. Связав параметры этих эмпирических результатов с параметрами ПСА, можно достигнуть искомой цели. При этом следует заметить, что почти все современные модели ПСА позволяют определять величины  $k_i(z)$ , диссипацию энергии  $\epsilon(z)$  и полную кинетическую энергию  $v(z)$  только качественно, в отличие от профиля ветра, который определяется гораздо точнее [17].

Остановимся теперь на другом моменте — модели ПСА. Как известно, теория ПСА далека от завершения, соответствующих моделей имеется много [3;6;8;11–13;19;21]. Одна из трудностей состоит в необходимости замыкания системы уравнений движения турбулентной жидкости. Другая связана с тем, что простейшая модель экмановского стационарного и горизонтально однородного ПСА не всегда с достаточной степенью точности отражает действительность [11]. Современные модели развиваются, с одной стороны, в сторону испытания более сложных способов замыкания, что позволяет надеяться на улучшение воспроизведения характеристик турбулентности, с другой — в сторону учета нестационарности, фазовых переходов, горизонтальной неоднородности поля ветра и подстилающей поверхности, условий на верхней границе и др.

Модель ПСА для задачи расчета переноса и диффузии примеси должна выбираться в зависимости от конкретной цели. Так, если необходимо учесть поворот ветра с высотой в ПСА и его зависимость от температурной стратификации, достаточно воспользоваться одной из интегральных моделей пограничного слоя, в которых  $k_z$  не зависит от вертикальной координаты, т.е.  $k_z = \text{const}$ .

Однако граничное условие прилипания при этом исказит результат, поэтому больше соответствует цели, например, модель [6], в которой на нижней границе используется закон сопротивления, опирающийся на характеристики приземного слоя. Эта модель воспроизводит качественно верно угол поворота ветра и его зависимость от стратификации. Однако если надо учитывать осаждение примеси на почву или если источник расположен вблизи подстилающей поверхности, то данная модель уже непригодна, т.к. она неправильно отражает диффузию вблизи источника и вблизи земной поверхности, где коэффициент турбулентности мал. Здесь нужна модель, учитывающая изменение  $k_z$  с высотой в приземном слое, например, [15].

В случае, когда необходимо учитывать вынос примеси за пределы пограничного слоя через верхнюю его границу, используемая модель должна воспроизводить механизм обмена со свободной атмосферой. Ясно, что в этом случае модель стационарного горизонтально однородного экмановского ПСА непригодна.

Рассмотрим теперь возможности получения входной информации, необходимой для использования модели ПСА. Это могут быть результаты метеорологических и аэрологических измерений, регулярно выполняемых органами Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды или отделами гидрометеорологии служб пути и со-

ружений ОАО «РЖД». Из этих данных необходимо получить следующие входные величины для модели: скорость геострофического ветра  $G$  и ее изменение с высотой (для учета бароклинности); параметр Кориолиса  $f = 2\omega \sin \varphi$ ; шероховатость местности  $z_0$ ; характеристика турбулентной стратификации (разность температур на нижней и верхней границах пограничного слоя  $\Delta T$ ) или приземный поток тепла  $H_0$ , для неэкмановского ПСА необходима еще его высота  $H$ . Перечисленных параметров достаточно, чтобы получать остальные с помощью модели [6;7].

Довольно сложной для определения оказывается характеристика местности — шероховатость. Обычно способы, основанные на использовании логарифмического профиля скорости ветра в приземном слое, пригодны только в случае горизонтально однородной подстилающей поверхности, в противном случае они дают лишь локальную характеристику. В виду сложности рельефа следует различать микрошероховатость, параметр, характеризующий приземный слой, и мезо- или макрошероховатость [12;15], которая может на порядок и более отличаться от микрошероховатости. Для определения мезо- и макрошероховатости нет единого общепринятого способа. Здесь пытаются использовать независимые определения динамической скорости  $U_*$  или выражения, позволяющие оценить шероховатость по данным о размерах препятствий и их расположении [3].

Поскольку модели пограничного слоя не очень чувствительны к значению параметра шероховатости, поэтому один из этих способов может быть применен для задач рассеяния примеси, причем масштаб осреднения должен соответствовать как площади, над которой распространяется примесь, так и площади, формирующей набегающий поток.

Возможен другой путь получения необходимой информации, опирающийся на приземные измерения. Для задач рассеяния примеси он достаточно приемлем. Зная шероховатость местности и скорость ветра на высоте флюгера, можно приближенно определить динамическую скорость  $U_*$ . Однако, пользуясь только приземными данными, очевидно, невозможно точно учесть бароклинность.

Рассмотрев кратко возможности получения параметров, необходимых для расчета рассеяния примеси, с помощью метеорологической и аэросиноптической, диагностической или прогностической информации, следует отметить, что с помощью модели можно достигнуть вполне удовлетворительного воспроизведения профилей ветра с учетом бароклинности: степень их погрешности будет определяться в основном степенью неточности входной информации. Необходимые для расчета рассеяния примеси харак-

теристики турбулентности также можно получить с помощью моделей ПСА, однако, степень адекватности их значительно ниже.

С определенной степенью допущения можно считать, что современные модели, пригодные для практического использования, позволяют удовлетворительно определять их только в нижней части ПСА и воспроизводить качественно их зависимости от входных параметров. В верхней части ПСА они могут быть рассчитаны с точностью до порядка, а в ряде случаев и ниже.

Поэтому любая модель рассеяния примеси, построенная на основе модели ПСА, для повышения надежности будет нуждаться в апробации, что выполнить технически не так просто, но возможно, например [15;17].

Возможные погрешности расчета и прогноза рассеяния примеси связаны не только с погрешностями измерения или прогноза входных величин, но и с их пространственной и временной изменчивостью. К таким изменениям относятся: суточная изменчивость, изменчивость, связанная с упорядоченным рельефом, обтеканием препятствий, береговой чертой, мезомасштабными атмосферными образованиями типа грозы, шквалов и др. Так, на равнине временная изменчивость типа суточного хода, как известно, приводит к тому, что в переходные периоды суток структура ПСА при одинаковых значениях входных параметров не идентична, так что для ее воспроизведения необходима нестационарная модель. Однако, зная степень неоднозначности связей между параметрами

пограничного слоя в суточном ходе, в задачах рассеяния примеси ею можно, как правило, пренебречь или, если необходимо, внести какие-то «прошенные поправки» в переходные часы. В то же время для учета влияния бризов вблизи береговой черты необходима специальная модель ПСА.

Когда же факторы изменчивости не дают четко определить или, когда они действуют в совокупности и в большом числе, используются статистические подходы [3;8]. Для задач рассеяния примеси наиболее важны сведения о мезомасштабной изменчивости скорости и направления ветра.

### **Выводы по работе и перспективы дальнейших исследований**

В целом применение моделей ПСА для расчетов рассеяния примеси по исходной метеорологической информации возможно и целесообразно. Модель ПСА должна выбираться в зависимости от конкретной постановки задачи. В качестве исходной метеорологической информации могут быть приняты результаты стандартных аэросиноптических метеорологических измерений, а в случае необходимости — информация, содержащаяся в краткосрочном прогнозе. Модель может опираться преимущественно на аэрологическую или приземную метеорологическую информацию. Пути преобразования этой информации во входные параметры ПСА принципиально известны, но для практического использования их при расчетах рассеяния примеси требуются дополнительные математические разработки. 

## Литература

1. Багров, А.Н. Комплексный прогноз приземных метеорологических величин / А.Н. Багров, Ф.Л. Быков, В.А. Гордин // Метеорология и гидрология. — 2014. — №5. — С. 5–17.
2. Безуглая, Э.Ю. Пятьдесят лет наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха / Э.Ю. Безуглая, Т.П. Ивлева, И.В. Смирнова // Метеорология и гидрология. — 2013. — №9. — С. 88–99.
3. Быков, Ф.Л. Статистическая коррекция прогнозов погоды по модели COSMO с помощью нейронных сетей / Ф.Л.Быков // Метеорология и гидрология. — 2020. — №3. — С. 5–21.
4. Воронов, О.В. Модель наклонной дальности видимости и визуального обнаружения взлетно-посадочной полосы в задымленном пограничном слое атмосферы: дис. ... канд. техн. наук, 05.13.16./ Олег Викторович Воронов; Защищена 02.07.98. Утв.19.03.99.КТ №055804. — М., 1998. — 254 с.
5. Воронов, О.В. К вопросу оценки загрязнения воздушной среды в результате эксплуатационной деятельности инфраструктуры железнодорожного транспорта / О.В. Воронов, В.А. Фисун // Наука и техника транспорта. — 2015. — №2. — С. 16–21.
6. Воронов, О.В. Локальная математическая модель переноса загрязняющих веществ в пограничном слое атмосферы в результате эксплуатационной деятельности точечных промышленных источников / О.В. Воронов, Э.Х. Тасанг, С.А. Сметанин // Наука и техника транспорта. — 2019. — №2. — С. 114–119.

7. Воронов, О.В. Моделирование структуры пограничного слоя атмосферы по оперативной метеорологической информации с целью прогноза переноса загрязняющих веществ / О.В. Воронов, В.В. Быкадоров, А.А. Данилейченко // Наука и техника транспорта. — 2020. — №1. — С. 117–122.
8. Демченко, П.Ф. Статистическое моделирование среднесуточных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере Московского мегаполиса методом множественной регрессии / П.Ф. Демченко, А.С. Гинзбург, Г.Г. Александров и др. // Метеорология и гидрология. — 2015. — №10. — С. 31–45.
9. Ефимов, А.Е. Метод определения потоков тепла, влаги и количества движения в стратифицированном приземном слое / А.Е. Ефимов // Метеорология и гидрология. — 2010. — №9. — С. 86–96.
10. Закарин, Э.А. Математическое моделирование загрязнения атмосферы города на основе геоинформационной системы / Э.А. Закарин, Б.М. Маркаримова // Известия АН. Физика атмосферы и океана. — 2000. — Т. 36, №3. — С. 366–375.
11. Зарипов, Р.Б. Расчёт концентраций загрязняющих веществ с использованием модели атмосферы WRF–ARW и химико-транспортной модели CHIMERE / Р.Б. Зарипов, И.Б. Коновалов, А.А. Глазкова // Метеорология и гидрология. — 2013. — №12. — С. 52–68.
12. Какарека, С.В. Использование модели AERMOD для оценки рассеивания выбросов формальдегида при производстве древесных слоистых материалов / С.В. Какарека, С.В. Саливончик, Ю.Г. Кокош // Метеорология и гидрология. — 2019. — №5. — С. 40–50.
13. Комаров, В.С. Об опыте использования динамико-стохастического подхода в задаче сверхкраткосрочного прогноза параметров состояния пограничного слоя атмосферы / В.С. Комаров, А.В. Лавриненко, Н.Я. Ломакина, С.Н. Ильин // Научно-технический журнал Метеорология и гидрология. — 2014. — №2. — С. 23–33.
14. Купаев, В.И. Наблюдение и оценка состояния окружающей среды на железнодорожном транспорте: Учебное пособие для студентов вузов ж. -д. транспорта / В.И. Купаев, С.В. Рассказов, Семин А.В. / Под ред. В.И. Купаева. — М.: Маршрут, 2006. — 390 с.
15. Мазурин, Н.Ф. Измерение турбулентности приземного слоя атмосферы в черте города / Н.Ф. Мазурин, М.К. Мацкевич, В.Т. Мильченко, М.А. Новицкий // Метеорология и гидрология. — 2010. — №6. — С. 38–50.
16. Мущенко, Б.Л. Сравнение моделей расчёта максимальных приземных концентраций загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу / Б.Л. Мущенко // Безопасность жизнедеятельности. — 2007. — №5. — С. 46–49.
17. Рубинштейн, К.Г. Сравнение результатов моделей переноса 85Кг в атмосфере с данными натурального эксперимента ACURATE / К.Г. Рубинштейн, А.Н. Сафронов, Д.А. Припачкин и др. // Метеорология и гидрология. — 2017. — №3. — С. 41–58.
18. Рублев, А.Н. Уточнение прогноза распространения загрязняющих веществ в атмосфере с помощью математического моделирования и инструментальных измерений / А.Н. Рублев, Ю.В. Власова, Е.В. Горбаренко // Метеорология и гидрология. — 2013. — №5. — С. 36–48.
19. Смирнова, М.М. Оценка воспроизведения региональной моделью характеристик пограничного слоя атмосферы / М.М. Смирнова, К.Г. Рубинштейн, В.П. Юшков // Метеорология и гидрология. — 2011. — №12. — С. 5–17.
20. Чичин, А.В. Экологические проблемы железнодорожного транспорта и пути их решения / А.А. Чичин // Экономика железных дорог. — 2001. — №9. — С. 84–96.
21. Фадеев, Р.Ю. Климатическая версия модели атмосферы ПЛАВ: разработка и первые результаты / Р.Ю. Фадеев, М.А. Толстых, Е.М. Володин // Метеорология и гидрология. — 2019. — №1. — С. 22–36.
22. Шнайдман, В.А. Современные подходы к моделированию атмосферного пограничного слоя в региональных и мезомасштабных прогностических схемах / В.А. Шнайдман, Л.В. Беркович, С.Н. Степаненко // Український гідрометеорологічний журнал, Розділ 2 Метеорологія та кліматологія. — 2006. — №1. — С. 33–47.
23. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., et al. Description of the Advanced Research WRF Version 3. — NCAR Technical Note NCAR/TN — 475+STR, 2008; doi: 10.5065/D68S4MVH.